

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Josip Bego

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Krešimir Vučković, dipl. ing.

Student:

Josip Bego

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se voditelju rada Doc. dr. sc. Krešimiru Vučkoviću te Prof. dr. sc. Mariu Šavaru na uloženom trudu, pruženoj pomoći i korisnim savjetima tokom izrade ovog rada.

Također se zahvaljujem svojoj obitelji; mami Vesni, tati Ivanu, sestri Margareti na bezuvjetnoj moralnoj i financijskoj podršci tijekom moga studija.

Josip Bego



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Josip Bego**

Mat. br.: 0035186512

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Vaga za mjerenje aerodinamičkog opterećenja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Wind tunnel balance**

Opis zadatka:

Zračni tunel je najčešće upotrebljavani eksperimentalni uređaj u Mehanici fluida. Ključni dio tunela je uređaj za mjerenje sila i momenata sile kojim struja zraka opterećuje ispitivani objekt u tunelu. Naziv takvog uređaja je vaga za mjerenje aerodinamičkog opterećenja.

U radu je potrebno koncipirati i konstruirati takav uređaj, prikladan za upotrebu na studentskom zračnom tunelu, ako su poznati sljedeći parametri:

- mjerene sekcije: 250 x 250 mm,
- maksimalna vrijednost pojedine komponente sile: 15 N,
- maksimalni moment sile oko uzdužne osi: 1,5 Nm.

Predvidjeti mjerenje triju komponenti sile te momenta sile oko uzdužne osi. Pretvorbu mjernih veličina u električki signal ostvariti primjenom odgovarajućih elektrootporničkih mjernih traka (tenzometara). Za mjerenje promjene otpora traka koristiti Wheatstoneov mjerni most. Pretpostaviti da će svi mjerni mostovi biti spojeni na mjerno pojačalo *QuantumX MX840A*, proizvođača *HBM*.

Vrijednosti potrebne za proračun i odabir pojedinih komponenti usvojiti iz postojećih rješenja sličnih uređaja, iskustvenih vrijednosti te u dogovoru s mentorom. Kompletно konstrukcijsko rješenje razraditi do razine radioničkih crteža. U radu navesti korištenu literaturu, norme i eventualnu pomoć.

Zadatak zadan:

5. svibnja 2015.

Rok predaje rada:

2. rok: 17. rujna 2015.


Predviđeni datumi obrane:

2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Krešimir Vučković

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Igor Bačen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	IX
1. UVOD.....	1
2. NAČIN RADA VAGE	2
2.1. Definicija koordinatnog sustava.....	3
3. ELEKTROPORNIČKE MJERNE TRAKE (TENZOMETRI)	6
3.1. Način rada tenzometara.....	6
3.2. Primjena tenzometara i Hookeova zakona.....	7
4. WHEATSTONEOV MJERNI MOST.....	10
4.1. Osnovni primjeri primjene Wheatstoneovog mjernog mosta.	11
4.1.1 Mjerenje na vlačno opterećenoj gredi	11
4.1.2 Mjerenje na savijanje opterećenoj gredi.....	12
4.1.3. Mjerenje na uvijanje opterećenom vratilu.	14
Slika 14: vratilo opterećeno na uvijanje [1]	14
5. VRSTE VAGE ZA MJERENJE AERODINAMIČKIH OPTEREĆENJA	16
5.1. Unutarnji tip vage za mjerenje aerodinamičkih opterećenja.....	16
5.2. Vanjski oblik vage za mjerenje aerodinamičkih opterećenja.....	19
6. UVID U PRIMJERE VAGA NA TRŽIŠTU	20
7. KONCIPIRANJE GEOMETRIJE VAGE.....	22
7.1. Mogući oblici geometrije na savijanje opterećenih odjeljaka.....	23
7.2. Stvaranje početne geometrije	24
7.3. Odabir tenzometarskih traka	25
8. KONSTRUIRANJE SEGMENTA OPTEREĆENIH NA SAVIJANJE	28
8.1. Osnovne jednadžbe i princip	28
8.2. Određivanje duljine l.....	30
8.3. Provjera mjerne osjetljivosti za segmente I i II.....	31
8.3.1. Provjera osjetljivosti na segmentu I uslijed djelovanja horizontalne sile i momenta sile oko vertikalne osi.....	33
8.3.2. Provjera osjetljivosti na segmentu II uslijed djelovanja horizontalne sile i momenta sile oko vertikalne osi.....	34
8.3.3. Provjera osjetljivosti na segmentu I i II uslijed djelovanja horizontalne sile	35
8.3.4. Provjera osjetljivosti na segmentima I i II uslijed djelovanja momenta sile oko vertikalne osi	36
8.4. Provjera mjerne osjetljivosti segmenta uslijed deset puta većeg iznosa opterećenja.....	37

8.4.1.	Provjera osjetljivosti na segmentu I uslijed djelovanja horizontalne sile i momenta sile oko vertikalne osi.....	37
8.4.2.	Provjera osjetljivosti na segmentu II uslijed djelovanja horizontalne sile i momenta sile oko vertikalne osi.....	38
8.4.3.	Provjera osjetljivosti na segmentu I i II uslijed djelovanja horizontalne sile	39
8.4.4.	Provjera osjetljivosti na segmentima I i II uslijed djelovanja momenta sile oko vertikalne osi	40
9.	KONSTRUIRANJE SREDIŠNJEG SEGMENTA ZA MJERENJE AKSIJALNOG OPTEREĆENJA.....	41
9.1.	Uvid u postojeće principe i rješenja	41
9.2.	Izračun u programskom paketu Abaqus.....	43
9.2.1.	Generiranje geometrije.....	43
9.2.2.	Zadavanje referentnih točaka za opterećenje	43
9.2.3.	Generiranje rubnih uvjeta pomaka	46
9.2.4.	Diskretizacija geometrije konačnim elementima	47
9.2.5.	Izračun mjerne osjetljivosti	47
9.2.6.	Kompenzacija signala uslijed interakcije ostalih opterećenja.....	52
9.2.7.	Izračun ekvivalentnog naprezanja za minimalna opterećenja.....	55
9.2.8.	Izračun ekvivalentnog naprezanja za maksimalno opterećenje	57
10.	KONSTRUIRANJE SEGMENTA ZA MJERENJE OPTEREĆENJA UVIJANJEM	59
10.1.	Generiranje geometrije.....	59
10.2.	Izračun mjerne osjetljivosti	60
10.2.1.	Mjerna osjetljivost za minimalno opterećenje	60
10.2.2.	Mjerna osjetljivost za maksimalno opterećenje	61
10.3.	Izračun naprezanja u programskom paketu Abaqus	62
10.3.1.	Generiranje geometrije torzijskog segmenta.....	62
10.3.2.	Generiranje rubnih uvjeta sila	62
10.3.3.	Generiranje rubnih uvjeta pomaka	64
10.3.4.	Diskretizacija geometrije torzijskog segmenta	65
10.3.5.	Izračun ekvivalentnog naprezanja za minimalna opterećenja torzijskog segmenta.....	65
10.3.6.	Izračun ekvivalentnog naprezanja za maksimalna opterećenja	67
	ZAKLJUČAK	68
	LITERATURA.....	70
	PRILOZI.....	71

POPIS SLIKA

Slika 1: Mali zračni tunel u institutu NASA [8].....	2
Slika 2: Definicija koordinatnog sustava za mjerenja na modelima u Europi.[11].....	3
Slika 3: Prikaz izračuna aerodinamičkih opterećenja pomoću poznatih kutova otklona [13] ...	4
Slika 4: Orijentacija koordinatnog sustava vage	5
Slika 5: Prikaz rada tenzometara [5]	6
Slika 6: Glavni smjer naprezanja prilikom vlačnog opterećenja [1].....	7
Slika 7: Glavni smjerovi naprezanja za posudu pod tlakom [1].	8
Slika 8: Rozeta 0°/45°/90° [1].....	8
Slika 9: 0°/60°/120° [1].....	9
Slika 10: Razni primjeri rozeta [1].....	9
Slika 11: Whetstoneov mjerni most [2].....	10
Slika 12: Vlačno opterećena greda [2]	11
Slika 13: Greda opterećena na savijanje [2].....	12
Slika 14: vratilo opterećeno na uvijanje [1]	14
Slika 15: deformacije diferencijalnog elementa [1]	14
Slika 16: Smještaj vage unutar modela [8].....	16
Slika 17: Vaga opremljena senzorima u prednjem i stražnjem dijelu [11]	17
Slika 18: Princip rada vage savijanjem [11].....	18
Slika 19: Primjer vage na principu momenata [11].....	18
Slika 20: Vanjski oblik vage u obliku platforme [8].....	19
Slika 21: Slika vage s dimenzijama [10].....	20
Slika 22: Vrlo mala vaga za mjerenje aerodinamičkih opterećenja	21
Slika 23: Prikaz vage u izometriji	21
Slika 24: a) pravokutna geometrija, b) križna geometrija i c) kavez s pet greda	23
Slika 25: početni oblik geometrije vage	24
Slika 26: rozeta 1-XY43-3/350[12].....	26
Slika 27:križna rozeta 1-XY93-3/350 [12].....	26
Slika 28: tenzometarske trake 1-LY43-3/350 [12].....	27
Slika 29: Sila i moment djeluju u referentnoj točki vage	28
Slika 30: očitavanje momenata inercije presjeka	31
Slika 31: Dimenzije poprečnog presjeka segmenta 1 i 2	32
Slika 32: Prikaz smještaja odabranih traka	33
Slika 33: Postojeće mjerne doze [11].....	41
Slika 34: Primjer aksijalnog segmenta vage	42
Slika 35: geometrija vage	43
Slika 36: središnja referentna točka	43
Slika 37:referentna točka na prednjoj strani.....	44
Slika 38: Opterećenja vage.....	44
Slika 39: Sva opterećenja na vagu u programskom paketu Abaqus	45
Slika 40: Rubni uvjeti pomaka na mjestu navoja	46
Slika 41: Rubni uvjeti pomaka na mjestu naslona	46
Slika 42: Diskretizirana geometrija vage	47
Slika 43: Deformirani oblik vage uslijed aksijalne sile.....	47
Slika 44: Smještaj tenzometara	48
Slika 50: shema rozete 1 Slika 51: Shema rozete 2.....	48

Slika 47: Putanja očitavanja na mjestu rozete 1	49
Slika 48: Putanja očitavanja na mjestu rozete 2	50
Slika 49: Iznosi deformacija za rozetu 1	50
Slika 50: Iznosi deformacija za rozetu 2	50
Slika 51: Deformirani oblik uslijed vertikalne sile i momenta sile oko poprečne osi	52
Slika 52: Očitavanje iznosa deformacije na mjestu rozete 1	53
Slika 53: Očitavanje iznosa deformacije na mjestu rozete 2	53
Slika 54: Ekvivalentna naprezanja za minimalna opterećenja	55
Slika 55: mjesto maksimalnih naprezanja 1	55
Slika 56: Mjesto maksimalnih naprezanja 2	56
Slika 57: Raspodjela naprezanja za maksimalne iznose opterećenja	57
Slika 58: Geometrija torzijskog segmenta	59
Slika 59: Dimenzije poprečnog presjeka	59
Slika 60: generirana geometrija torzijskog segmenta	62
Slika 61: Udaljenost referentne točke od torzijskog segmenta	63
Slika 62: zadavanje rubnih uvjeta za referentnu točku 1	63
Slika 64: Sva opterećenja na model	64
Slika 65: Zadavanje rubnih uvjeta pomaka za torzijski segment	64
Slika 66: Diskretizirana geometrija torzijskog segmenta	65
Slika 67: Ekvivalentno naprezanje uslijed minimalnih opterećenja	65
Slika 68: Ekvivalentno naprezanje uslijed maksimalnih opterećenja	67

POPIS TABLICA

Tablica 1: Definicija pozitivnih osi koordinatnog sustava fiksiranog na model [11]	5
Tablica 2: Specifikacije vage	20
Tablica 3: Minimalni iznosi svih sila i momenata	45
Tablica 4: Predznaci deformacije za različita opterećenja na mjestu 1 i 2	52
Tablica 5: Maksimalni iznosi opterećenja.....	57

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

BROJ CRTEŽA	Naziv iz sastavnice
JB-2015-Z01	Vlačni i savojni segment
JB-2015-Z02	Torzijski segment
JB-2015-Z03	Vaga za mjerenje aerodinamičkih opterećenja

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
B	-	faktor Wheatstoneovog mosta
e	mm	Udaljenost rubova presjeka od simetrale ili nullinije
E	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Youngov modul elastičnosti
F_A (F_X)	N	aksijalna sila
F_C	N	sila bočnog vjetra
F_D	N	sila otpora zraka
F_L	N	sila uzgona
F_N (F_Z)	N	normalna sila
F_S (F_Y)	N	bočna sila
G	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	modul elastičnosti pri smicanju
k	–	faktor tenzometarske trake
l	mm	udaljenost između dvaju segmenata za mjerenje opterećenja savijanjem
M_t	Nm	moment uvijanja (torzije)
M_f	Nm	moment savijanja (fleksije)
M_X	Nm	moment oko uzdužne osi
M_Y	Nm	moment oko poprečne osi
M_Z	Nm	moment oko vertikalne osi
$R_{P\ 0,2}$	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Konvencionalna granica tečenja
S	-	faktor sigurnosti

U_A / U_E	mV/V	omjer izlaznog i ulaznog napona
W_t	mm ³	torzijski moment otpora
$W_{I,II}$	mm ³	moment otpora savijanju u presjeku I i II
α	°	kut otklona modela u vertikalnoj ravnini
γ_{xy}	1	kutna deformacija
$\varepsilon, \varepsilon_{a,b,c}, \varepsilon_{1,2,3,4}$	1	duljinska deformacija u smjeru glavnih naprezanja
ν	-	poissonov koeficijent
$\sigma, \sigma_I, \sigma_{II}$	$\frac{N}{mm^2}$	komponenta normalnog naprezanja
σ_{dop}	$\frac{N}{mm^2}$	dopušteno naprezanje za materijal
σ_{ekv}	$\frac{N}{mm^2}$	ekvivalentno naprezanje po teoriji najveće distorzijske energije HMM
τ_{tmax}	$\frac{N}{mm^2}$	maksimalno naprezanje uvijanjem
τ_{XY}	$\frac{N}{mm^2}$	komponenta posmičnog naprezanja
ψ	°	kut otklona modela u horizontalnoj ravnini

SAŽETAK

Kroz ovaj završni rad prošlo se kroz osnove načina rada vage za mjerenje aerodinamičkih opterećenja kao i osnove principa rada te načine mjerenja raznih opterećenja tenzometrima. Nakon što su upoznate osnove, opisani su razni tipovi vaga za mjerenje aerodinamičkih opterećenja i njihovih performansi. Potom je odrađen odabir vage i izvršeno usmjeravanje koncipiranja geometrije vage za odabrani tip. Nakon koncipiranja geometrije izvršena je prilagodba geometrije kako bi se postigli željeni rasponi mjerne osjetljivosti. Zbog kompleksnog oblika geometrije provjera čvrstoće provedena je metodom konačnih elementa u programskom paketu Abaqus. Nakon višestrukih iterativnih pokušaja postignut je kompromis između zahtjeva za dobrom mjernom osjetljivošću pri najnižim iznosima opterećenja i zahtjeva izbjegavanja pojave trajne plastične deformacije.

1. UVOD

Inženjeri u zrakoplovnoj i auto industriji koriste zračne tunele kako bi ispitali predložene komponente. Ispitivani modeli postavljaju se i fiksiraju u središte tunela. Prilikom ispitivanja na ispitivani model nastrujava zrak određenom brzinom pri čemu na model djeluje sila otpora zraka, a ovisno o geometriji modela sila uzgona, bočna sila te momenti sile. Vage za mjerenje aerodinamičkog opterećenja služe za mjerenje sila i momenata direktno na modelu.

Postoje razne izvedbe vaga za mjerenje aerodinamičkih opterećenja koje su prilagođene pojedinim zahtjevima prilikom mjerenja. U ovome završnom radu cilj je konstruirati vagu za mjerenje aerodinamičkih opterećenja koja omogućava istovremeno mjerenje vrlo malih opterećenja za potrebe malog studentskog zračnog tunela, a može se po potrebi koristiti i za mjerenje većih opterećenja. Mjerenje deformacija uslijed djelovanja triju komponenata sila i momenta sile oko uzdužne osi vršit će se odgovarajućim elektrootporničkim trakama (tenzometrima) pri čemu se mjerene veličine pretvaraju u električni signal. Pretvaranje mjerenih veličina u električni signal pogodno je iz razloga što se slabi odzivi zbog malih opterećenja mogu pojačati mjernim pojačalom. Nadalje pravilnim rasporedom i spajanjem tenzometarskih traka u Wheatstoneov mjerni most omogućuje se mjerenje deformacije samo pojedine komponente opterećenja npr. vlačno opterećenja dok ostale komponente ne utječu na odziv. Geometrija same vage mora omogućiti dovoljan odziv tj. mjernu osjetljivost traka te na taj način osigurati što točnije mjerenje deformacija, time i izračun sila i momenata sila koji djeluju na model. S druge strane geometrija mora osiguravati dovoljnu čvrstoću kako prilikom opterećenja ne bi došlo do trajne plastične deformacije. Način spajanja, mjesto spajanja tenzometarskih traka u Wheatstoneov most, način prilagođavanja geometrije te izračun očekivane mjerne osjetljivosti bit će prikazani u pojedinim poglavljima.

2. NAČIN RADA VAGE

Tijekom testa ispitivani model smješta se unutar mjerene sekcije zračnog tunela te se pričvrsti na vagu za mjerenje aerodinamičkih opterećenja. Prilikom testa dolazi do nastrujavanja zraka na model pri čemu ovisno o geometriji ispitivanog modela dolazi do djelovanja sila i momenata sila. Sile i momenti sile prenose se na vagu te vrše deformacije na geometriji vage.

Na (Slika 1) prikazan je mali školski zračni tunel instituta NASA.

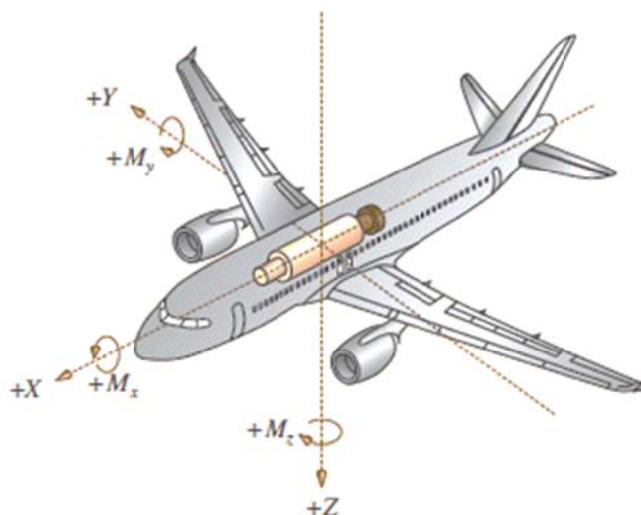


Slika 1: Mali zračni tunel u institutu NASA [8]

Način pretvorbe mjerene veličine u električni signal zadan je i bit će opisan tokom idućih poglavlja.

2.1. Definicija koordinatnog sustava

Najčešće primjenjivani koordinatni sustav u mjerenjima jest koordinatni sustav fiksiran u središtu modela poravnat s uzdužnom osi modela. Koordinatni sustav za mjerenja na modelima u Europi odgovara desno orijentiranom koordinatnom sustavu koji je baziran na standardu DIN-EN 9300 ili ISO 1151. Definicija koordinatnog sustava u Europi prikazana je na (Slika 2). [11]

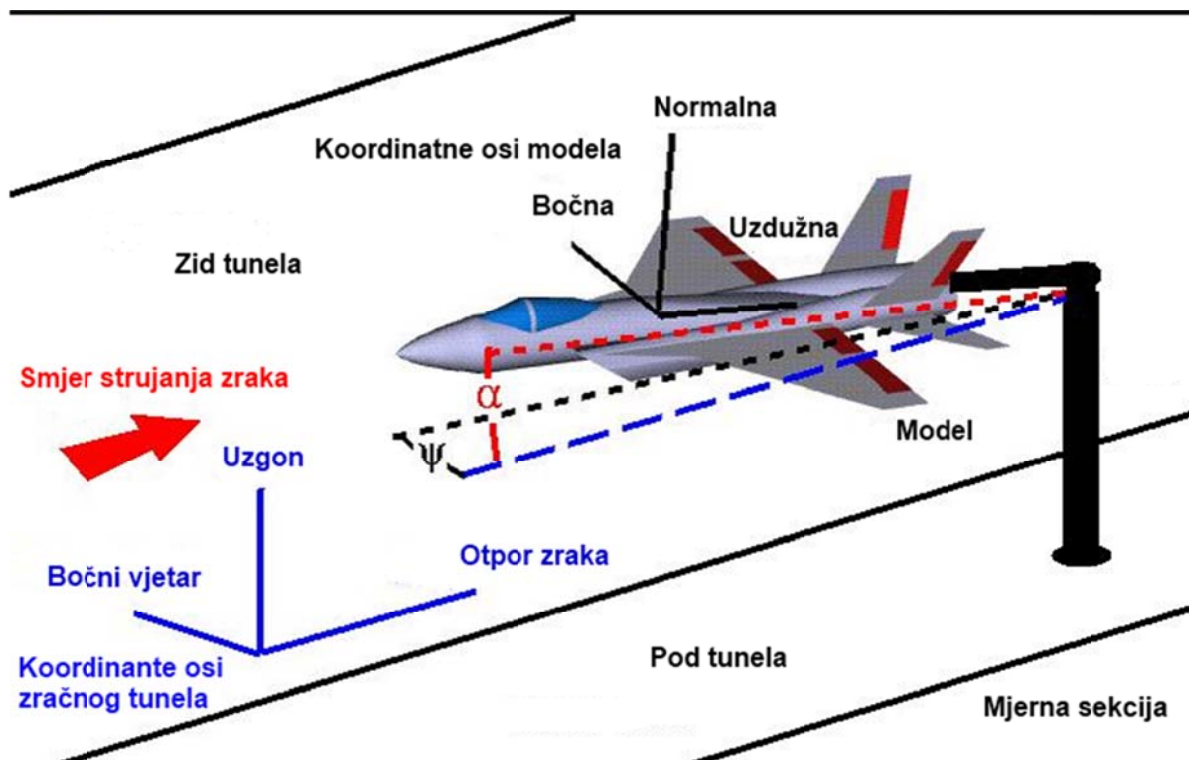


Slika 2: Definicija koordinatnog sustava za mjerenja na modelima u Europi.[11]

Sila uzgona (F_L) najčešće je definirana kao sila koja djeluje na model vertikalno u odnosu na smjer glavnog toka strujanja zraka. Sila otpora zraka (F_D) definirana je kao sila koja djeluje u smjeru glavnog toka strujanja zraka. Potrebno je obratiti pažnju na definiciju pozitivnog i negativnog smjera pri čemu se u Europi težini i potisku modela daje pozitivan smjer djelovanja.

Važno je napomenuti da se aerodinamičke sile poklapaju s koordinatnim sustavom koji je isključivo poravnat s glavnim smjerom strujanja zraka. Iz navedenog razloga vage za mjerenje aerodinamičkih opterećenja ne mjere direktno aerodinamička opterećenja. Opterećenja koja djeluju na model mjere se vagom za mjerenja aerodinamičkih opterećenja, a aerodinamička opterećenja potom se izračunavaju iz mjerenih komponenti pomoću odgovarajućih kutova otklona. [11]

Izračun aerodinamičkih opterećenja iz opterećenja mjerenih na modelu pomoću kutova otklona prikazano je na (Slika 3).



Slika 3: Prikaz izračuna aerodinamičkih opterećenja pomoću poznatih kutova otklona [13]

Prema [13] iz navedenog slijede jednadžbe:

Jednadžba sile uzgona F_L glasi

$$F_L = F_N \cdot \cos \alpha - F_A \cdot \sin \alpha, \quad (2.1)$$

gdje je F_N normalna sila, a F_A uzdužna sila koja djeluje na model zrakoplova prikazan na (Slika 3).

Jednadžba sile otpora zraka F_D glasi

$$F_D = F_A \cdot \cos \alpha \cdot \cos \psi - F_N \cdot \sin \alpha \cdot \cos \psi. \quad (2.2)$$

Jednadžba sile bočnog vjetra F_C glasi

$$F_C = F_S \cdot \cos \psi + F_A \cdot \cos \alpha \cdot \sin \psi - F_N \cdot \sin \alpha \cdot \sin \psi \quad (2.3)$$

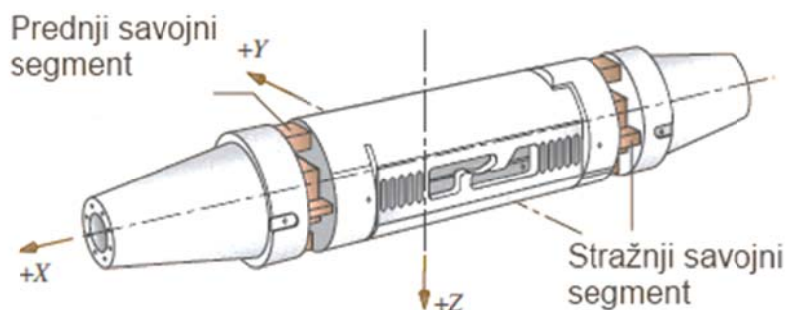
gdje je F_S bočna sila, F_A uzdužna sila, a F_N normalna sila koja djeluje na model zrakoplova prikazan na (Slika 3).

Pozitivni smjerovi djelovanja za navedeni koordinatni sustav kao nazivi i iznosi zadanih sila i momenata sila dani su u (Tablica 1).

Tablica 1: Definicija pozitivnih osi koordinatnog sustava fiksiranog na model [11]

Koordinatni sustav vage	Naziv komponente	Definicija pozitivnog smjera
$X \quad F_x$	Aksijalna sila	U smjeru leta
$Y \quad F_y$	Bočna sila	Na desno
$Z \quad F_z$	Normalna sila	Prema dolje
M_x	Moment oko uzdužne osi	Valjanje na desno
M_y	Moment oko poprečne osi	Zakret gore
M_z	Moment oko vertikalne osi	Zakret na desno

Orijentacija koordinatnog sustava vage prikazana na (Slika 4) poklapa se s orijentacijom koordinatnog sustava na modelu .



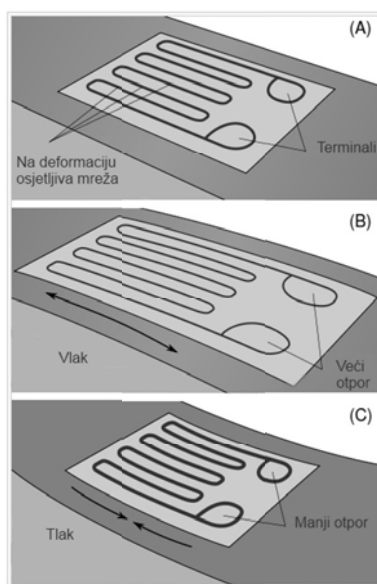
Slika 4: Orijentacija koordinatnog sustava vage

3. ELEKTROTPORNIČKE MJERNE TRAKE (TENZOMETRI)

Kako je zadano da je potrebno pretvoriti mjerene veličine u električni signal elektrootporničkim mjernim trakama, tokom ovog i idućeg poglavlja opisat će se principi i otkrića neophodna za izradu vage za mjerenje aerodinamičkih opterećenja koja radi na principu elektrootporničkih mjernih traka.

3.1. Način rada tenzometara

Elektrootpornička mjerna traka radi na principu električne vodljivosti koja ovisi o geometriji vodiča [5]. Ako bismo el. vodič čvrsto zalijepili na površinu neopterećene konstrukcije i zatim konstrukciju opteretili, konstrukcija će se deformirati, a s njome i el. vodič. Deformacija el. vodiča bit će jednaka deformaciji površine na koju je zalijepljen pri čemu dolazi do promjene duljine vodiča te se sukladno promjeni duljine vodiča mijenja otpor. Povećanjem duljine el. vodiča otpor raste, a skraćanjem duljine otpor pada [6].



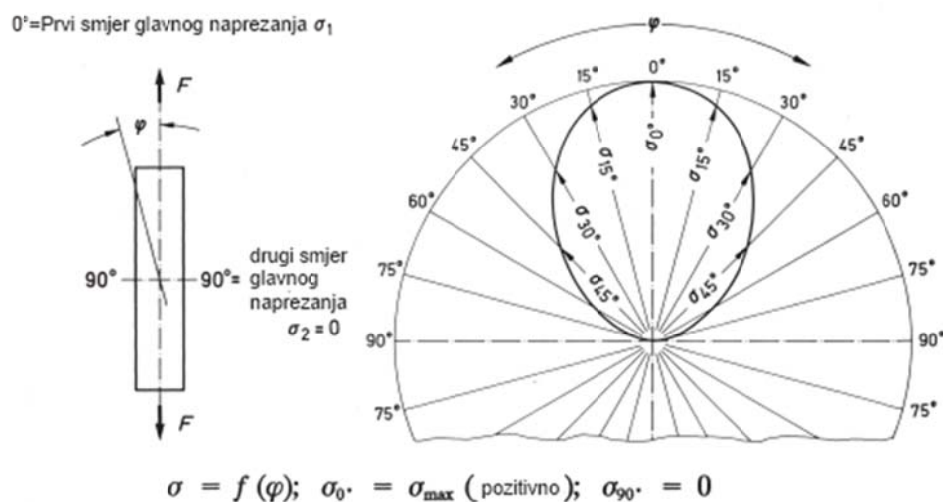
Slika 5: Prikaz rada tenzometara [5]

Stalni i čvrsti kontakt između elektrootporničke mjerne trake i površine ostvaruje se adekvatnim ljepilima. Izbor ljepila vrši se ovisno o željenom vijeku trajanja sustava za mjerenje koji može varirati od nekoliko tjedana pa do nekoliko godina. Vrlo važna je priprema površine koja mora biti pažljivo očišćena.

3.2. Primjena tenzometara i Hookeova zakona

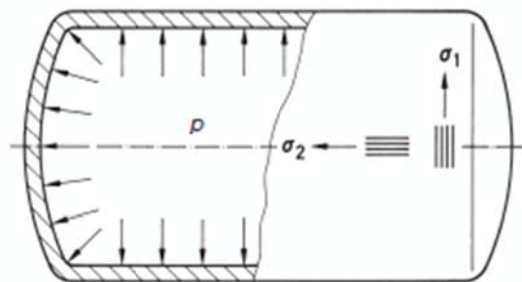
Jedna od mogućih primjena elektrootporničkih mjernih traka je kod linearnog (jednoosnog) stanja naprezanja, a takva stanja nastaju kod osnog opterećenja i savijanja. U tom slučaju naprezanje je opisano Hookeovim zakonom iz [6]

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (3.1)$$



Slika 6: Glavni smjer naprezanja prilikom vlačnog opterećenja [1].

Ukoliko se radi o ravninskom stanju naprezanja s poznatim smjerovima glavnih naprezanja kao što je to slučaj kod posuda pod tlakom onda su nam potrebna barem dva tenzometra.



Slika 7: Glavni smjerovi naprezanja za posudu pod tlakom [1].

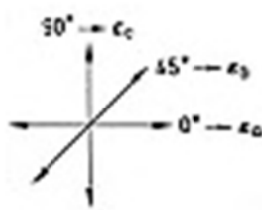
U ovom slučaju vrijede proširene formule Hookeova zakona prema [4]

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2) , \quad (3.2)$$

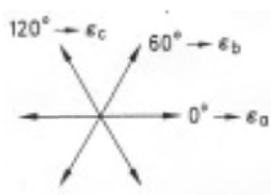
$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1) . \quad (3.3)$$

Kod objekata kompleksne geometrije koji su istovremeno opterećeni sa više različitih opterećenja npr. (vlak, savijanje ili torzija) predviđanje glavnih smjerova naprezanja nije moguće te je potrebno koristiti sljedeću metodu.

Prvo je potrebno mjeriti deformacije u tri smjera A B C koja se najčešće mjeri rozetama $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ i $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ [6].



Slika 8: Rozeta $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ [1]



Slika 9: 0°/60°/120° [1]

Kada znamo deformacije ε_a , ε_b i ε_c iz sljedećih izraza možemo odrediti iznose glavnih naprezanja.

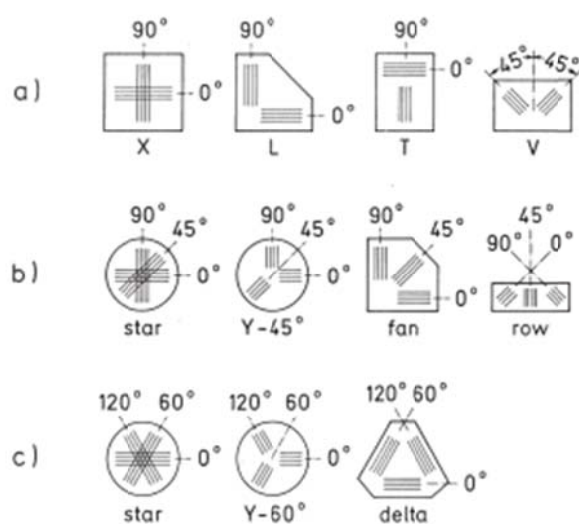
Za rozetu 0°/45°/90° prema [1] str. 196 izraz za određivanje iznosa glavnih naprezanja glasi

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_b + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2} \quad (3.4)$$

Za rozetu 0°/60°/120° prema [1] str. 197 izraz za određivanje iznosa glavnih naprezanja glasi

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} \pm \frac{E}{1+\nu} \cdot \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}{3}\right)^2 + \frac{1}{3}(\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2} \quad (3.5)$$

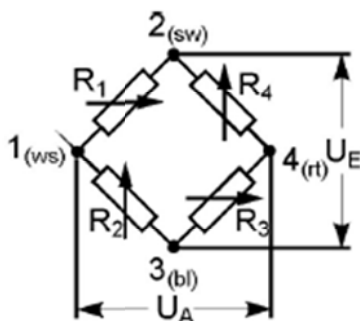
Na (Slika 510) prikazani su razni oblici tenzometara već tvornički izrađenih u rozetu.



Slika 10: Razni primjeri rozeta [1].

4. WHEATSTONEOV MJERNI MOST

Sir Charles Wheatstone 1843 g. otkrio je mjerni most koji omogućava mjerenje električnog otpora. Taj mjerni most poznat je danas kao Wheatstoneov mjerni most. U Wheatstoneovom mjernom mostu nepoznati otpori uspoređuju se sa dobro utvrđenim otporima. Wheatstoneov mjerni most vrlo je pogodan za mjerenje malih promjena otpora te je iz tog razloga pogodan za mjerenje promjena otpora u tenzometarskoj traci [2].



Slika 11: Wheatstoneov mjerni most [2]

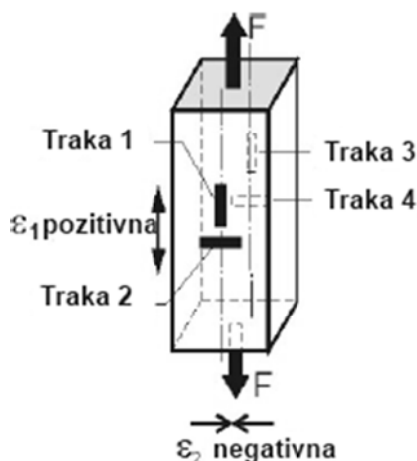
Veza između deformacija mjerenih pojedinom tenzometarskom trakom te omjera izlaznog napona U_A i ulaznog napona U_E dana je jednačinom (4.1) preuzetom iz [2] str. 2

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4). \quad (4.1)$$

U idućem odlomku bit će detaljnije objašnjena primjena Wheatstoneovog mjernog mosta pri analizi naprezanja za jednostavne probleme.

4.1. Osnovni primjeri primjene Wheatstoneovog mjernog mosta.

4.1.1 Mjerenje na vlačno opterećenoj gredi



Slika 12: Vlačno opterećena greda [2]

Kao što je prikazano na (Slika 12) tenzometarske trake se lijepe na nasuprotne paralelne plohe pri čemu se na svakoj plohi jedna tenzometarska traka lijepi u smjeru djelovanja sile dok se druga traka lijepi poprečno na smjer djelovanja sile. Kad se greda optereti vlačnom silom F doći će do deformacije $\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E}$ u smjeru djelovanja sile gdje je σ naprezanje u gredi, a E Youngov modul elastičnosti.

Poprečno nalijepljena tenzometarska traka očitat će deformaciju $\varepsilon_2 = -\nu \cdot \varepsilon_1$ gdje je ν poissonov koeficijent, a $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ duljinske deformacije u uzdužnim smjerovima traka 1, 2, 3 i 4. Kako je $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \varepsilon$ i $\varepsilon_2 = \varepsilon_4 = \varepsilon$ uvrštavanjem u (4.1)

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} (\varepsilon - (-\nu\varepsilon) + \varepsilon - (-\nu\varepsilon)), \quad (4.2)$$

dobivamo izraz

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{2} \cdot \varepsilon (1 + \nu). \quad (4.3)$$

Sada izrazimo ε

$$\varepsilon = \frac{U_A}{U_E} \cdot \frac{2}{k} \cdot \frac{1}{1+\nu}. \quad (4.4)$$

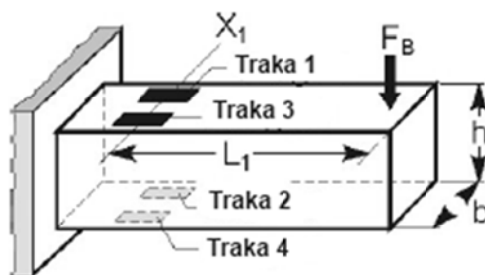
Kako nam je mjerenjem poznat omjer $\frac{U_A}{U_E}$ te ν i E izračunamo deformaciju ε te daljnjim uvrštavanjem u jednadžbu Hookeova zakona (3.1) možemo izračunati naprezanje

$$\sigma = \varepsilon \cdot E,$$

a iz naprezanja i poznate površine poprečnog presjeka A iznos aksijalne sile F .

Važno je uočiti da će za simetrične presjeke u slučaju kada osim vlačnog opterećenja imamo savijanje i/ili torziju doći do kompenzacije utjecaja torzije i savijanja. Prilikom kompenzacije signala u mjerenju uzrokovanih torzijom potrebno je tenzometarske trake smjestiti simetrično u odnosu na os simetrije objekta. Kompenzacija toplinske dilatacije ostvaruje se zbog spajanja traka u Wheatstoneov mjerni most pri čemu svaka traka mjeri jednaku deformaciju uslijed toplinske dilatacije grede te dolazi do poništavanja signala.

4.1.2 Mjerenje na savijanje opterećenoj gredi



Slika 13: Greda opterećena na savijanje [2]

Kao i u prethodnom primjeru ponovno se koristi jednadžba (4.1) međutim razlika je u tome što sada za ovako postavljene trake vrijede sljedeće pretpostavke $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$, $\varepsilon_3 = -\varepsilon_4$ i

$|\varepsilon_1| = |\varepsilon_2| = |\varepsilon_3| = |\varepsilon_4|$ što nakon uvrštavanja daje

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} [\varepsilon_1 - (-\varepsilon_2) + \varepsilon_3 - (-\varepsilon_4)]. \quad (4.5)$$

Daljnjim sređivanjem izraza dobivamo

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot 4 \cdot |\varepsilon|. \quad (4.6)$$

Potom izrazimo deformaciju prema [2] str. 8

$$|\varepsilon| = \frac{U_A / U_E}{k}. \quad (4.7)$$

Općenito prema [2] str. 8 jednačba (4.6) poprima oblik

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot B \cdot |\varepsilon|. \quad (4.8)$$

Faktor B predstavlja izvedbu Wheatstoneovog mosta. Ako je riječ o punom mostu $B = 4$, a ako je riječ o polu mostu $B = 2$.

Daljnjim razmatranjem ovako pozicioniranih i spojenih traka vrlo lako se dolazi do zaključka kako će u slučaju kada uz savijanje greda biva opterećena vlačno i /ili uvijanjem doći do kompenzacije uslijed navedenih superponiranih opterećenja.

Kompenzacija temperaturnih razlika ostvaruje se zbog spajanja traka u Wheatstoneov mjerni most pri čemu svaka traka mjeri jednaku deformaciju uslijed toplinske dilatacije grede te dolazi do kompenzacije signala. Kompenzacija uslijed utjecaja toplinske dilatacije prikazuje jednačba

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} [(\varepsilon_M + \varepsilon_W)_1 - (-\varepsilon_M + \varepsilon_W)_2 + (\varepsilon_M + \varepsilon_W)_3 - (-\varepsilon_M + \varepsilon_W)_4] = \frac{k}{4} \cdot 4\varepsilon_M, \quad (4.9)$$

gdje je ε_M deformacija uslijed mehaničkog opterećenja, a ε_W uslijed toplinskog opterećenja.

Za vlačno opterećenje i ovako pozicionirane i spojene trake vrijede sljedeće pretpostavke

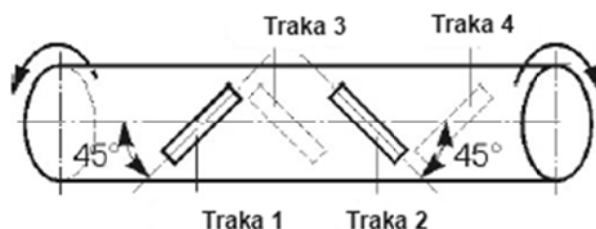
. $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$, $\varepsilon_3 = \varepsilon_4$ i $|\varepsilon_1| = |\varepsilon_2| = |\varepsilon_3| = |\varepsilon_4|$. Nakon uvrštavanja u jednadžbu (4.1)

dobivamo

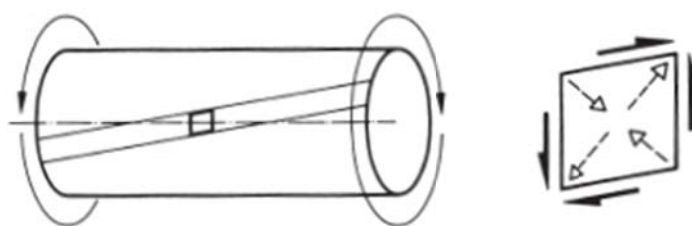
$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} [\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4] = 0. \quad (4.10)$$

Prethodni izraz tako dokazuje kompenzaciju uslijed vlačnog opterećenja. [1]

4.1.3. Mjerenje na uvijanje opterećenom vratilu.



Slika 14: vratilo opterećeno na uvijanje [1]



Slika 15: deformacije diferencijalnog elementa [1]

Poznato je da se na vratilu opterećenom na uvijanje smjerovi glavnih naprezanja javljaju pod kutem od 45° u odnosu na pravce smještene u cilindričnom plaštu koji su paralelni longitudinalnoj osi vratila. Iz tog razloga najpogodnije za primjenu su X ili Y rozete čija mjerna mreža je postavljena za $\pm 45^\circ$ u odnosu na os simetrije mjerne trake.

Iz (slike 11) vidljivo je da će tenzometarska traka 1 i 3 očitavati pozitivnu deformaciju dok će trake 2 i 4 očitavati negativnu deformaciju. Kako vrijedi $|\varepsilon_1| = |\varepsilon_2| = |\varepsilon_3| = |\varepsilon_4|$ jednačba (4.1) poprima oblik kao u [2] str. 9

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} [\varepsilon_1 - (-\varepsilon_2) + \varepsilon_3 - (-\varepsilon_4)], \quad (4.11)$$

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot 4 \cdot |\varepsilon|, \quad (4.12)$$

$$|\varepsilon| = \frac{U_A / U_E}{k}. \quad (4.13)$$

Kako je prema [6] str. 98

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot \gamma_{xy}, \quad (4.14)$$

$$\tau_{xy} = G \cdot \gamma_{xy}. \quad (4.15)$$

Slijedi izraz za posmično naprezanje:

$$\tau_{xy} = 2G \cdot \varepsilon. \quad (4.16)$$

Nadalje vrijedi prema [7] str. 182

$$\tau_{t\max} = \frac{M_t}{W_t}. \quad (4.17)$$

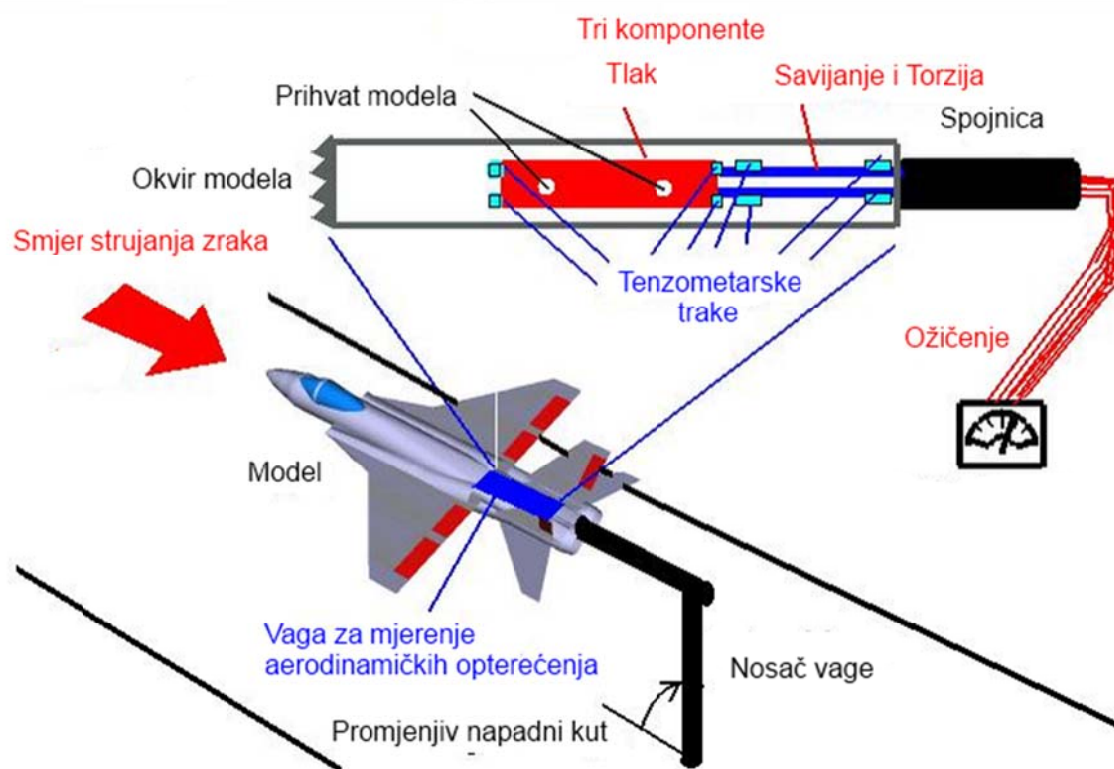
Spoj tenzometara u puni Wheatstoneov mostu prilikom mjerenja opterećenja uvijanjem najpogodniji je za kompenzaciju signala uslijed superponiranih normalnih i savojnih opterećenja [1]. Kompenzacija temperaturnih razlika ostvaruje se zbog spajanja traka u Wheatstoneov mjerni most pri čemu svaka traka mjeri jednaku deformaciju uslijed toplinske dilatacije grede te dolazi do kompenzacije signala.

5. VRSTE VAGE ZA MJERENJE AERODINAMIČKIH OPTEREĆENJA

Kako je princip mjerenja već definiran potrebno je razmotriti postojeće tipove vaga s obzirom na model koji se ispituje. U idućim odlomcima objašnjena su dva najosnovnija tipa vaga.

5.1. Unutarnji tip vaga za mjerenje aerodinamičkih opterećenja

Vaga može biti unutarnja smještena u središtu modela kao što je to prikazano na (Slika 16). U tom slučaju vaga se pričvršćuje na nosač vaga, a ispitivani model se pričvršćuje za prihvate. [11]

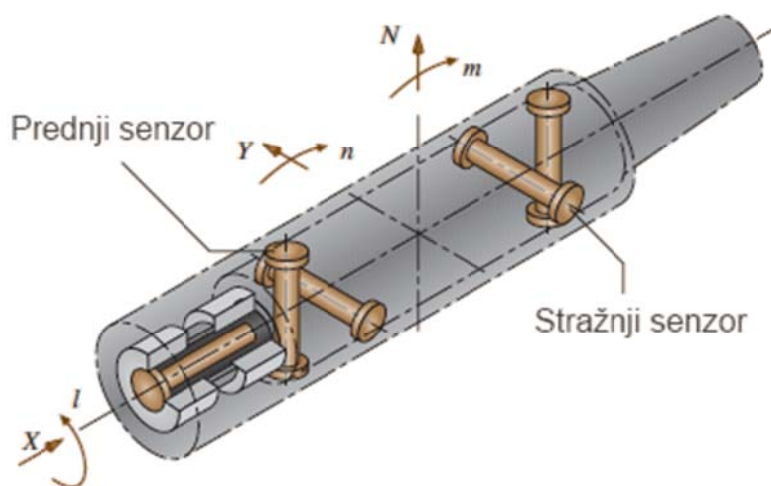


Slika 16: Smještaj vage unutar modela [8]

Unutarnja vaga može se podijeliti na:

a) Vagu za mjerenje sile (*force balance*)

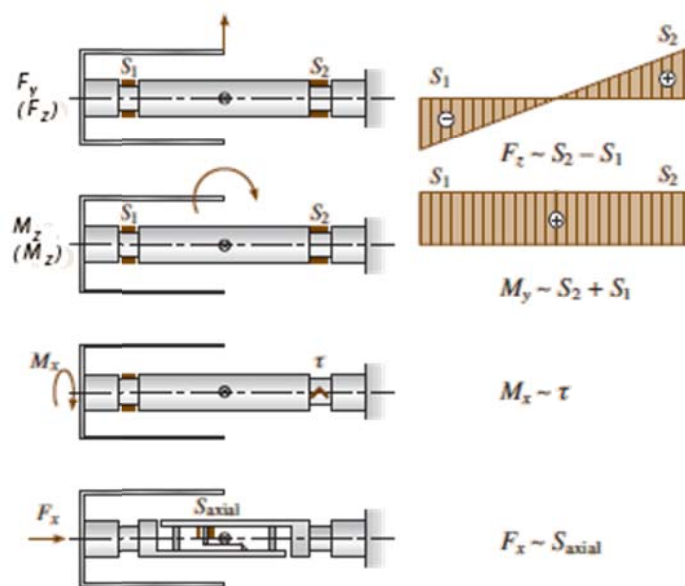
Ovaj tip vage koristi dva mjerna segmenta koji su smješteni u prednjem i stražnjem djelu vage. Mjerenja se u tim odjeljcima najčešće izvode vlačno tlačnim sensorima. Ovako naprijed i straga mjerene komponente koriste se za izračun rezultirajućih sila u ravnini kao i momenta oko uzdužne osi. Primjer takve vage prikazan je na (Slika 17).



Slika 17: Vaga opremljena senzorima u prednjem i stražnjem dijelu [11]

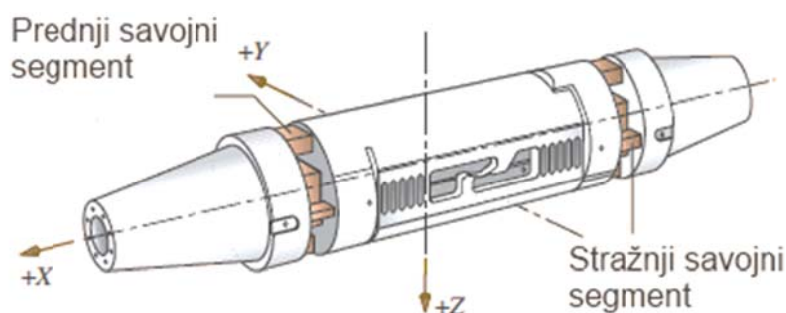
b) Vaga na principu momenata (*moment-type balance*)

Vage ovakvog tipa imaju segmente za mjerenje momenata savijanja u prednjem i stražnjem dijelu vage. Na (Slika18) odjeljci za mjerenje momenata savijanja označeni su sa S_1 i S_2



Slika 18: Princip rada vage savijanjem [11]

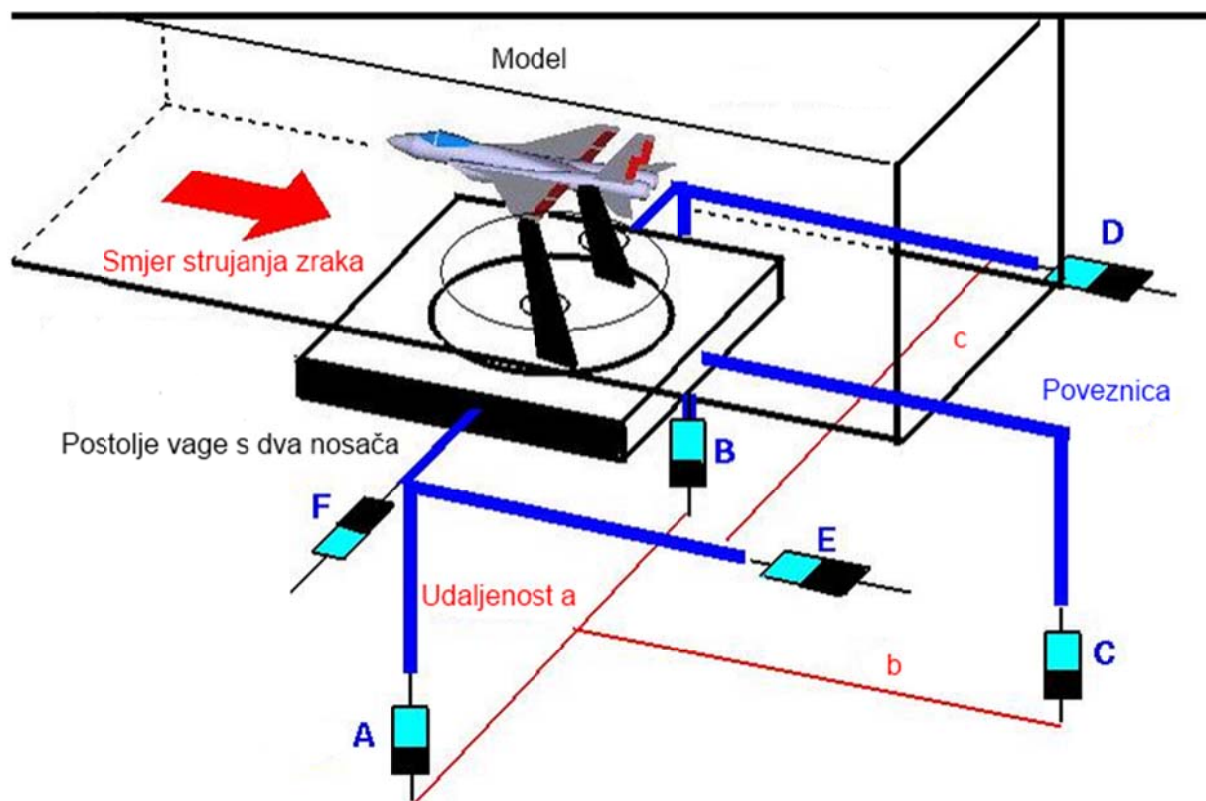
Mjerenje dvaju momenata savijanja u segmentima S_1 i S_2 nužno je kako bi se očitao iznos signala koji je proporcionalan sili u ravnini mjerenja te drugi iznos signala koji je proporcionalan momentu oko osi okomite na ravninu mjerenja. Raspodjela naprezanja na slici pokazuje kako su momenti M_y (M_z) proporcionalni sumi signala u segmentima S_1 i S_2 . Nadalje sila F_y (F_z) proporcionalna je razlici signala u segmentima S_1 i S_2 . Na (Slika 19) prikazan je primjer vage koja radi na principu momenata savijanja. [11]



Slika 19: Primjer vage na principu momenata [11]

5.2. Vanjski oblik vage za mjerenje aerodinamičkih opterećenja

Idući način je kao što je prikazano na (Slika 20) jest eksterna vaga u obliku platforme na koju se pričvršćuje model. Na platformu je pričvršćeno 6 elektrootproničkih mjernih traka označenih od A do F. Navedene trake mjere deformacije platforme uslijed aerodinamičkih sila koje djeluju na model [8].

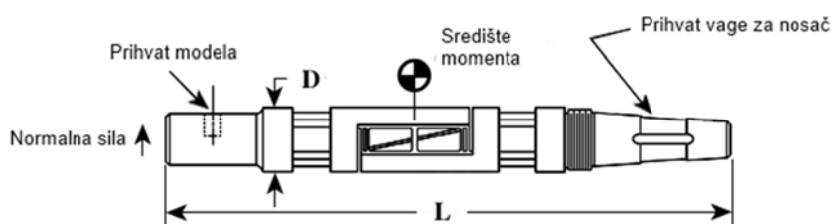


Slika 20: Vanjski oblik vage u obliku platforme [8]

6. UVID U PRIMJERE VAGA NA TRŽIŠTU

Pretraga postojećih primjera na tržištu nije dala mnogo rezultata iz razloga što se u većini slučajeva vage za mjerenje aerodinamičkih opterećenja izrađuju po narudžbi za točno definirani raspon opterećenja i veličine modela te se najčešće izrađuje samo jedan primjerak.

Neke od tvrtki kao što je MODERNE MACHINE & TOOL CO.INC imaju u ponudi vage za različiti spektar opterećenja. Primjer vage navedene tvrtke prikazan je na (Slika 21), a specifikacije su dane u (Tablica 2).



Slika 21: Slika vage s dimenzijama [10]

Tablica 2: Specifikacije vage

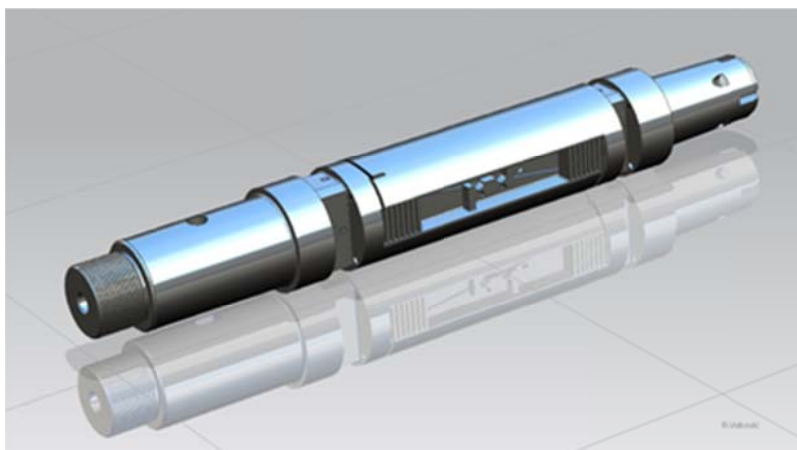
Promjer D (mm)	Dužina L (mm)	Opterećenja u središtu vage (N/Nm)					
		Normalna sila	Uzdužna sila	Moment oko poprečne osi	Moment oko uzdužne osi	Moment oko vertikalne osi	Bočna sila
10,16	95,25	13	9	0,56	0,33	0,33	9
12,7	119,38	333	67	8,47	1,7	2,8	111
19,05	158,75	667	133	22,6	5,65	11,3	334
25,4	254	1779	445	67,8	11,3	22,6	445
38,1	292,1	2669	1335	169,5	45,19	79	1334
44,45	311,15	6672	1779	282,5	90,4	135,6	2669
50,8	323,85	8896	2224	395,5	169,5	226	3556
76,2	546,1	13345	2224	847,4	339	339	5338
101,6	615,95	24465	2224	2824,6	11030	11030	6672
127	660,4	33362	15569	4519,4	2712	1356	4448

Iz prethodno prikazane tablice vidljivo je da se dimenzije vage smanjuju sa smanjenjem opterećenja koje je potrebno mjeriti. Također je važno napomenuti da su cijene vage za mjerenje malih opterećenja vrlo visoke zbog preciznosti izrade geometrije i pozicioniranja tenzometarskih traka.

Na (Slika 22) prikazan je primjer vrlo male vage za mjerenje aerodinamičkih opterećenja koja je dimenzijama manja od penkale.



Slika 22: Vrlo mala vaga za mjerenje aerodinamičkih opterećenja



Slika 23: Prikaz vage u izometriji

Isto tako važno je napomenuti kako većina unutarnjih vaga za mjerenje aerodinamičkih opterećenja rade na principu momenata (*moment-type internal balance*) prikazan u poglavlju 5. U dogovoru sa mentorom dogovoreno je kako će se izrađivati unutarnja vaga za mjerenje aerodinamičkih opterećenja koja radi na principu mjerenja momenata savijanja.

7. KONCIPIRANJE GEOMETRIJE VAGE

Kako je način pretvaranja mjerenih veličina u električni signal zadan, a tip vage odabran po dogovoru s mentorom, potrebno je koncipirati geometriju vage uzimajući u obzir prethodno utvrđene parametre.

Prilikom koncipiranja geometrije vage potrebno je obratiti pažnju na ograničenja i zahtjeve koji se postavljaju na vagu za mjerenje aerodinamičkih opterećenja u studentskom zračnom tunelu.

Ograničenja:

- a) poprečni presjek vage mora biti što manji u odnosu na poprečni presjek mjerene sekcije 250 x 250 mm .Po mogućnosti tako dimenzioniran da poprečni presjek vage bude manji od poprečnog presjeka ispitivanog modela
- b) ograničenja zbog standardnih dimenzija tenzometara za koje su potrebne adekvatne veličine površina.
- c) dostupnost tehnologije izrade geometrije s obzirom na njezin oblik.

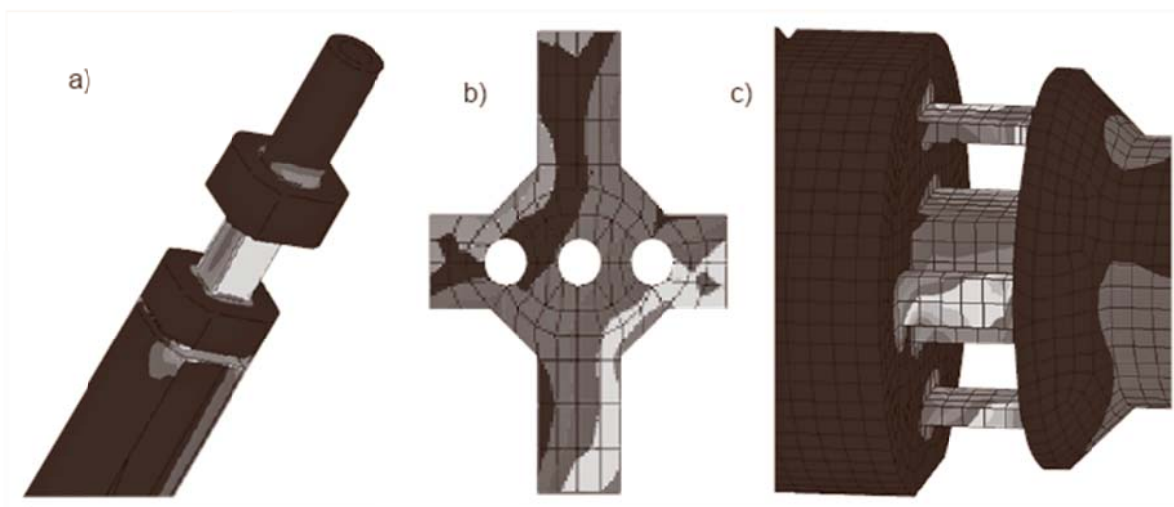
Zahtjevi:

- a) površine na koje će se lijepiti tenzometri moraju biti dovoljno velike kako bi se omogućilo jednostavnije naljepljivanje istih.
- c) geometrija vage mora osigurati dovoljan odziv tenzometarskih traka za maksimalne iznose triju komponenata sile od 15 N te maksimalni iznos momenata sile oko uzdužne osi od 1.5 Nm.
- b) vaga će se koristiti i za širi spektar opterećenja do maksimalnih iznosa opterećenja
- d) geometrija vage također mora biti dovoljne čvrstoće kako ne bi došlo do trajne plastične deformacije djelovanjem zadanog opterećenja.
- e) potrebno je pozicionirati i spojiti mjerne trake u Wheatstoneov mjerni most tako da utjecaj uslijed superpozicije više različitih opterećenja budu kompenzirane.

Iz navedenih zahtjeva vidljivo je da će se zadovoljavajući oblik geometrije postići iterativnim postupkom. Potrebno je primijetiti kako dimenzije modela koji će se ispitivati nisu dane u zadatku niti su naknadno dobivene. Također je važno napomenuti kako je sa mentorom dogovoreno da gore navedeni maksimalni iznosi postanu minimalni iznosi zbog mogućih vrlo malih dimenzija vage koja drastično poskupljuje izradu. Iz tog razloga prilikom oblikovanja geometrije treba obratiti pažnju da se geometrijom postigne dovoljna mjerna osjetljivost za minimalna opterećenja ali da se dimenzijama poprečnih presjeka osigura mogućnost mjerenja i većih opterećenja.

7.1. Mogući oblici geometrije na savijanje opterećenih odjeljaka

Kako bismo mogli postići što bolju mjernu osjetljivost potrebno je pravilno oblikovati geometriju pojedinih odjeljaka. Uvidom u neke od već postojećih oblika geometrije znatno olakšava odabir. Na (Slika 24) prema [11] prikazani su mogući oblici geometrije.

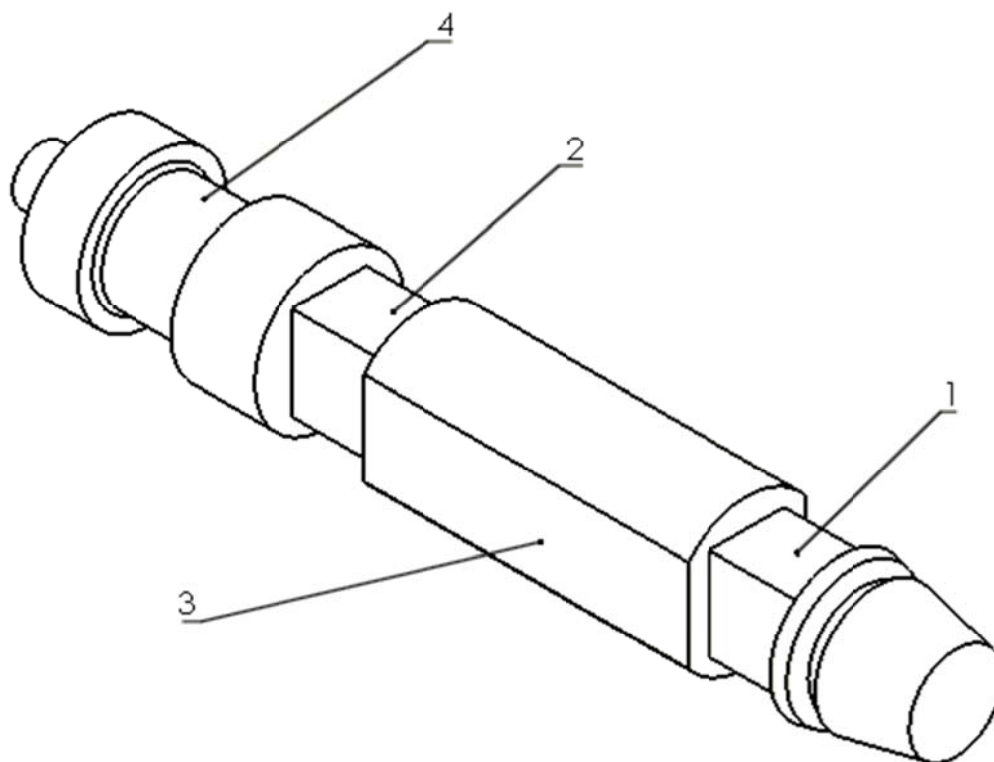


Slika 24: a) pravokutna geometrija, b) križna geometrija i c) kavez s pet greda

Zbog jeftinije i lakše izrade, pogodnijeg oblika geometrije za lijepljenje tenzometarskih traka odabran je pravokutni oblik geometrije.

7.2. Stvaranje početne geometrije

Vodeći se oblikom geometrije za rad vage za mjerenje aerodinamičkih opterećenja na principu savijanja koji je opisan u 5. poglavlju generirana je početna geometrija prikazana na (Slika 25).



Slika 25: početni oblik geometrije vage

Segmenti za mjerenje pojedinih opterećenja numerirana su od 1 – 4. Na segmentima 1 i 2 mjerit će se deformacije uslijed savijanja u vertikalnoj i horizontalnoj ravnini, a tenzometarske trake bit će spojene u Wheatstoneov polumost. Jedna od traka lijepi se uzdužno na gornju horizontalnu plohu, a druga na donju horizontalnu plohu tako da linija osi simetrije trake poklapa sa linijom simetrije plohe.

Na segmentu 4 mjerit će se deformacije uslijed djelovanja momenta torzije, a na segmentu 3 mjerit će se deformacije uslijed djelovanja aksijalne sile.

Izrada središnjeg segmenta geometrije zbog kompleksnosti do sada nije detaljno prikazana.

Detaljnija razrada navedene sekcije bit će prikazana u nekome od idućih poglavlja.

7.3. Odabir tenzometarskih traka

Prilikom dimenzioniranja pojedinih presjeka kao što je već spomenuto potrebno je voditi računa o dovoljnoj mjernoj osjetljivosti ali i o dimenzijama ploha na koje će se lijepiti tenzometarske trake. Kako bismo prilikom dimenzioniranja odjeljaka mogli voditi računa o dovoljnoj veličini ploha potrebno je odabrati tip trake i dimenzije trake.

Tip trake odabrat ćemo s obzirom na:

- a) poznatu vrstu materijala na kojem se vrše mjerenja (aluminij).
- b) poznato stanje naprezanja
- c) poznate glavne smjerove naprezanja

Od velike pomoći prilikom odabira je dijagram toka za odabir traka iz kataloga tvrtke HBM.

Također je prilikom odabira traka vrlo važno iskustvo rada s trakama i njihovim pozicioniranjem te spajanjem u Wheatstoneov most. Iz navedenog razloga tenzometarske trake odabrane su uz pomoć mentora iz kataloga tvrtke HBM [12].

Za mjerenje momenta sile oko uzdužne osi na odjeljku 4 odabrana je rozeta **1-XY43-3/350** prikazana na (Slika 26).

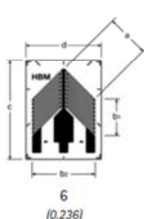
XY43

Temperature response matched to aluminum
with $\alpha = 23 \cdot 10^{-6}/K$ ($12.8 \cdot 10^{-6}/^{\circ}F$)

XY4x

Temperature response matched to customer's choice
see page 16

Illustrations show actual size
(Data: grid length in mm/inch)

0.6
(0.024)1.5
(0.059)3
(0.118)6
(0.236)

Contents per package: 5 pcs.

	Steel	Aluminum	Other	Ω	Measuring grid			Measuring grid carrier		V	
					a	b1	b2	c	d		
1-XY41-0.6/120			1-XY4x-0.6/120 ⁽¹⁾	120	0.6 0.024	2.2 0.087	1.6 0.063	6.5 0.256	4.6 0.181	1.5	LS 7
1-XY41-1.5/120			1-XY4x-1.5/120	120	1.5 0.059	1.8 0.071	3.1 0.122	7.5 0.295	4.6 0.181	2.5	LS 7
1-XY41-3/120			1-XY4x-3/120	120	3 0.118	3 0.118	5.4 0.213	11 0.433	8 0.315	5	LS 7
1-XY41-6/120			1-XY4x-6/120	120	6 0.236	6 0.236	10.2 0.402	16 0.63	12.2 0.48	9.5	LS 4
1-XY41-1.5/350			1-XY4x-1.5/350 ⁽¹⁾	350	1.5 0.059	2.1 0.083	3.1 0.122	7.5 0.295	4.5 0.177	4	LS 7
1-XY41-3/350		1-XY43-3/350	1-XY4x-3/350	350	3 0.118	4.2 0.165	5.6 0.22	11 0.433	8 0.315	9.5	LS 7
1-XY41-6/350			1-XY4x-6/350	350	6 0.236	6 0.236	10 0.394	16 0.63	12.2 0.48	16	LS 4
1-XY41-3/700			1-XY4x-3/700	700	3 0.118	4.2 0.165	5.6 0.22	11 0.433	8 0.315	13.5	LS 7
			1-XY4x-6/700	700	6 0.236	6 0.24	10 0.39	16 0.63	12.2 0.48	23	LS 4

⁽¹⁾ Solder terminals are not compulsory

⁽¹⁾ Types are only available with matching to aluminum, ferritic or austenitic steel

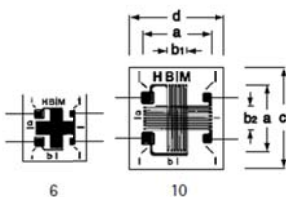
Slika 26: rozeta 1-XY43-3/350[12]

Za mjerenje tlačnog opterećenja na odjeljku 2 odabrana je križna rozeta **1-XY93-3/350** prikazana na (Slika 27).

$10^{-6}/K$ ($12.8 \cdot 10^{-6}/^{\circ}F$)

response matched to customer's choice

show actual size
length in mm/inch



Steel	Aluminum	Other	Ω	a	b1	b2	c	d	V	
1-XY91-1.5/120	1-XY93-1.5/120	1-XY9x-1.5/120	120	1.5 0.059	1.2 0.047	1.2 0.047	4.7 0.185	6.7 0.264	1	LS 5
1-XY91-3/120	1-XY93-3/120	1-XY9x-3/120	120	3 0.118	1.4 0.055	1.3 0.051	6.2 0.244	7.9 0.311	2	LS 5
1-XY91-6/120	1-XY93-6/120	1-XY9x-6/120	120	6 0.236	1.9 0.075	2.2 0.087	10 0.394	9.6 0.378	3.5	LS 4
1-XY91-10/120		1-XY9x-10/120	120	10 0.394	3.2 0.126	3.8 0.15	15.2 0.598	14.0 0.551	6.5	LS 212
1-XY91-1.5/350		1-XY9x-1.5/350 ⁽¹⁾	350	1.5 0.059	1.5 0.059	1.5 0.059	4.7 0.185	6.7 0.264	2.5	LS 5
1-XY91-3/350	1-XY93-3/350	1-XY9x-3/350	350	3 0.118	1.5 0.059	1.4 0.055	6.2 0.244	7.9 0.311	3.5	LS 5
1-XY91-6/350	1-XY93-6/350	1-XY9x-6/350	350	6 0.236	2 0.079	2.2 0.087	10 0.394	9.6 0.378	6	LS 4
		1-XY9x-10/350	350	10 0.394	3.3 0.13	3.7 0.146	15.2 0.551	14 0.551	11.5	LS 212

⁽¹⁾ Solder terminals are not compulsory

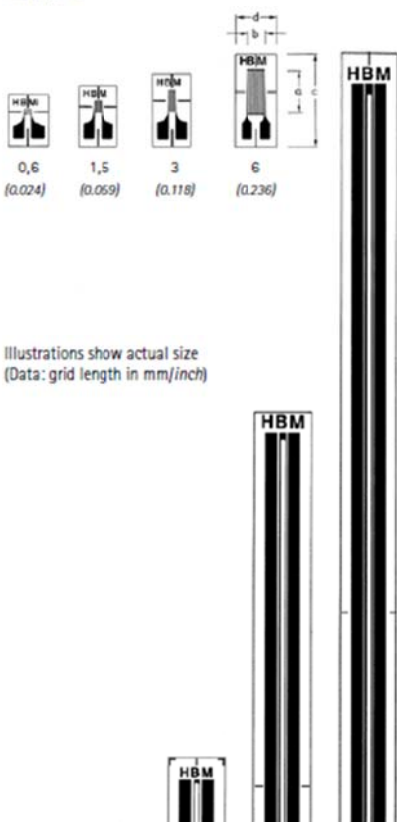
⁽¹⁾ Types are only available with matching to aluminum, ferritic or austenitic steel

Slika 27:križna rozeta 1-XY93-3/350 [12]

Za mjerenje opterećenja uslijed savijanja na odjeljcima 1 i 3 odabrane su tenzometarske trake **1-LY43-3/350** prikazane na (Slika 28).

Temperature response matched to aluminum
with $\alpha = 23 \cdot 10^{-6}/K$ ($12.8 \cdot 10^{-6}/^{\circ}F$)

LY4x
Temperature response matched to customer's choice
see page 16



Illustrations show actual size
(Data: grid length in mm/inch)

				Measuring grid		Measuring carrier			
Steel	Aluminum	Other	Ω	a	b	c	d	V	
1-LY41-0.6/120		1-LY4x-0.6/120 ⁽¹⁾	120	0.6 0.024	1.1 0.043	6 0.236	4 0.157	1.5	LS 5
1-LY41-1.5/120		1-LY4x-1.5/120	120	1.5 0.059	1.2 0.047	7 0.276	5 0.197	2.5	LS 5
1-LY41-3/120	1-LY43-3/120	1-LY4x-3/120	120	3 0.118	1.2 0.047	8 0.315	5 0.197	3.5	LS 5
		1-LY4x-3/120A	120	3 0.118	1.2 0.047	8 0.315	5 0.197	3.5	LS 5
1-LY41-6/120	1-LY43-6/120	1-LY4x-6/120	120	6 0.236	2.7 0.106	13.9 0.547	5.9 0.232	8	LS 5
1-LY41-6/120A		1-LY4x-6/120A	120	6 0.236	2.7 0.106	13.9 0.547	5.9 0.232	8	LS 5
1-LY41-10/120		1-LY4x-10/120	120	10 0.394	4.9 0.193	18 0.709	8 0.315	14	LS 5
		1-LY4x-10/120A	120	10 0.394	4.9 0.193	18 0.709	8 0.315	14	LS 5
1-LY41-20/120		1-LY4x-20/120	120	20 0.787	0.5 0.020	31.8 1.252	8.2 0.323	6.5	LS 5
1-LY41-50/120		1-LY4x-50/120	120	50 1.969	0.8 0.031	63.6 2.504	8.2 0.323	12	LS 5
1-LY41-100/120		1-LY4x-100/120	120	100 3.937	1 0.039	114.8 4.520	8.2 0.323	19	LS 5
1-LY41-150/120		1-LY4x-150/120	120	150 5.906	1.2 0.047	165.6 6.520	8.2 0.323	25	LS 5
1-LY41-1.5/350		1-LY4x-1.5/350 ⁽¹⁾	350	1.5 0.059	2.3 0.091	9.2 0.362	5.9 0.232	6.5	LS 5
1-LY41-3/350	1-LY43-3/350	1-LY4x-3/350	350	3 0.118	2.5 0.098	10.9 0.429	5.9 0.232	9	LS 5
1-LY41-3/350A		1-LY4x-3/350A	350	3 0.118	2.5 0.098	10.9 0.429	5.9 0.232	9	LS 5
1-LY41-6/350	1-LY43-6/350	1-LY4x-6/350 ⁽²⁾	350	6 0.236	2.8 0.110	13.9 0.547	5.9 0.232	15	LS 5
		1-LY4x-6/350A	350	6 0.236	2.8 0.110	13.9 0.547	5.9 0.232	15	LS 5
1-LY41-10/350		1-LY4x-10/350	350	10 0.394	5 0.197	18 0.709	8 0.315	24	LS 5
		1-LY4x-10/350A	350	10 0.394	5 0.197	18 0.709	8 0.315	24	LS 5
1-LY41-3/700	1-LY43-3/700	1-LY4x-3/700	700	3 0.118	2.7 0.106	10.9 0.429	5.9 0.232	13	LS 5
1-LY41-6/700		1-LY4x-6/700	700	6 0.236	4.1 0.161	13.9 0.547	5.9 0.232	23	LS 5
		1-LY4x-10/700	700	10 0.394	5 0.197	18 0.709	8 0.315	33	LS 5
		1-LY4x-3/1000 ⁽¹⁾	1,000	3 0.118	2.7 0.106	10.9 0.429	5.9 0.232	16	LS 5
1-LY41-6/1000		1-LY4x-6/1000	1,000	6 0.236	4.2 0.165	13.9 0.547	5.9 0.232	27	LS 5
		1-LY4x-10/1000	1,000	10 0.394	5 0.197	18 0.709	8 0.315	40	LS 5

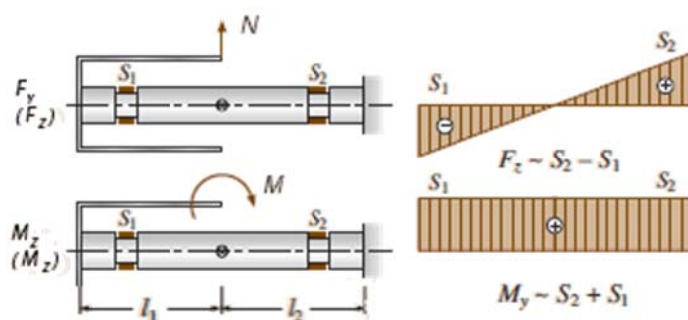
Slika 28: tenzometarske trake 1-LY43-3/350 [12]

8. KONSTRUIRANJE SEGMENTA OPTEREĆENIH NA SAVIJANJE

Nakon što smo odabrali oblik segmenta opterećenog na savijanje potrebno je dimenzionirati poprečni presjek i razmak segmenta tako da se odziva za mjerenu komponentu sile nalazi unutar dogovorenog raspona od 0.1 mV/V do 1.5 mV/V počevši od minimalno predviđenog iznosa sile od 15 N.

8.1. Osnovne jednadžbe i princip

Sve unutarnje vage za mjerenje aerodinamičkog opterećenja mjere iznose sile i momenta sile na dva odjeljka raspoređena duž X osi. Idealan slučaju nastupa kada je polovica signala proporcionalan sili, a druga polovica signala proporcionalna momentu sile. Na taj način osigurano je jednostavno razlikovanje signala nastalih djelovanjem sile i momenta sile. Kako bismo za silu i moment dobili isti odziv na odjeljcima potrebno je odrediti udaljenost $l = l_1 + l_2$. [11]



Slika 29: Sila i moment djeluju u referentnoj točki vage

[11]

Izrazi za naprezanja u segmentima I i II uslijed djelovanja sile N i momenta sile M prikazanih na (Slika 29) glase

$$\sigma_I = \frac{M_{f1}}{W_I} = \frac{M + N \cdot l_1}{W_I}, \quad (8.1)$$

$$\sigma_{II} = \frac{M_{f2}}{W_{II}} = \frac{M - N \cdot l_2}{W_{II}}. \quad (8.2)$$

gdje su W_I i W_{II} momenti otpora pri savijanju za poprečni presjek segmenta I i II.

Kako su poprečni presjeci isti , a udaljenosti jednake slijedi

$$W_I = W_{II}.$$

$$l_1 = l_2.$$

Izrazi za sumu naprezanja $\sigma_I + \sigma_{II}$ i razliku $\sigma_I - \sigma_{II}$ glasi

$$\sigma_I + \sigma_{II} = M \left(\frac{1}{W_I} + \frac{1}{W_{II}} \right) + N \left(\frac{l_1}{W_I} - \frac{l_2}{W_{II}} \right) = \frac{2M}{W}, \quad (8.3)$$

$$\sigma_I - \sigma_{II} = M \left(\frac{1}{W_I} - \frac{1}{W_{II}} \right) + N \left(\frac{l_1}{W_I} + \frac{l_2}{W_{II}} \right) = \frac{Nl}{W}. \quad (8.4)$$

Iz jednadžbe (8.3) vidljivo je da je suma naprezanja samo proporcionalna momentu M , a iz (8.4) razlika naprezanja proporcionalna sili N . Iz toga proizlazi da suma odziva S_1 i S_2 proporcionalan momentu M , a razlika odziva S_1 i S_2 je proporcionalna sili N .

$$\sigma_1 + \sigma_2 \approx \Delta U_M \quad (8.5)$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 \approx \Delta U_N \quad (8.6)$$

Iz toga se može izvesti izraz

$$\frac{\Delta U_M}{\Delta U_N} = \frac{2M}{Nl}. \quad (8.7)$$

Kako je cilj postići da omjer $\frac{\Delta U_M}{\Delta U_N} = 1$ izraz za duljinu l glasi

$$l = \frac{2M}{N}. \quad (8.8)$$

8.2. Određivanje duljine l

Problem određivanja udaljenosti l u ovom slučaju nastaje zato što nije zadan iznos momenta M . Kako zadani moment sile oko uzdužne osi M_x (*Rolling moment*) najčešće istog reda veličine kao moment oko poprečne osi M_y (*Pitching moment*) i moment oko vertikalne osi M_z (*Yawing moment*), uzet ćemo da je

$$M = M_y = M_x = M_z = 1,5 \text{ Nm.}$$

Zadano je:

$$M_x = 1,5 \text{ Nm} \quad (8.9)$$

$$N = 15 \text{ N.} \quad (8.10)$$

Sada možemo izračunati potrebnu dužinu l prema (8.8)

$$l = \frac{2M}{N} = \frac{2 \cdot 1,5 \text{ Nm}}{15 \text{ N}} = 0,2 \text{ m.} \quad (8.11)$$

Kako je u [11] str. 568 navedeno da ukoliko izračunata dužina l biva prevelika potrebno je odabrati željenu dužinu uz oprez da signal uslijed sile ne bude puno manji od signala uslijed momenta. Zbog ograničenosti prostora za smještaj vage odabrana je dužina $l = 100 \text{ mm}$.

8.3. Provjera mjerne osjetljivosti za segmente I i II

Vrijede relacije:

$$W_I = W_{II} = W \quad (8.12)$$

$$l_1 = l_2 = \frac{l}{2} = \frac{100}{2} = 50 \text{ mm.} \quad (8.13)$$

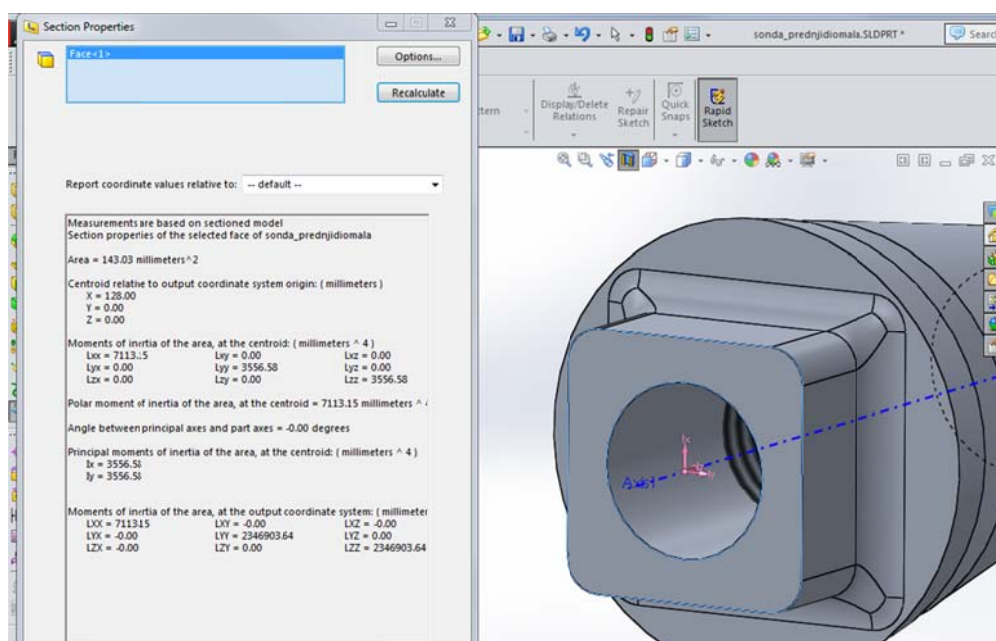
Zadano je :

$$M_Z = 1,5 \text{ Nm} \quad k = 2 \quad (8.14)$$

$$N = F_x = F_y = F_z = 15 \text{ N.} \quad (8.15)$$

Prema [7] modul elastičnosti za aluminij iznosi

$$E_{Al} = 72000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (8.16)$$



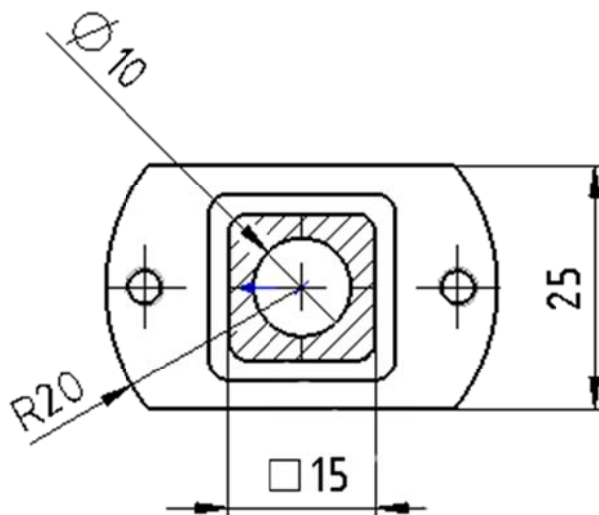
Slika 30: očitavanje momenata inercije presjeka

Iz generirane geometrije pomoću programa Solidworks 2014 očitani su momente inercije I_y, I_x što je prikazano na (Slika 30).

Očitane vrijednosti momenata inercije iznose

$$I_x = I_y = 3556,58 \text{ mm}^4. \quad (8.17)$$

Zbog ograničenja nametnutih dimenzijama tenzometarskih traka i zahtjeva za mogućnost mjerenja većih opterećenja izabran je i dimenzioniran presjek prikazan na (Slika 31).



Slika 31: Dimenzije poprečnog presjeka segmenta 1 i 2

Iz dimenzija poprečnog presjeka očitamo visinu h poprečnog presjeka te izračunamo udaljenost rubova presjeka od simetrale

$$e = \frac{h}{2} = \frac{15}{2} = 7,5 \text{ mm}. \quad (8.18)$$

Sada vrijednosti uvrstimo u jednadžbu

$$W = \frac{I}{e} = \frac{3556,58}{7,5} = 474,202 \text{ mm}^3 \quad (8.19)$$

i dobijemo iznos momenta otpora pri savijanja za ovako dimenzioniran poprečni presjek.

8.3.1. *Provjera osjetljivosti na segmentu I uslijed djelovanja horizontalne sile i momenta sile oko vertikalne osi*

Prema jednadžbi (8.1) naprezanje u segmentu iznosi

$$\sigma_I = \frac{M_{f_1}}{W_I} = \frac{M_Z + N \cdot \frac{l}{2}}{W_I} = \frac{1,5 \cdot 1000 + 15 \cdot 50}{474,202} = 4,74 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (8.20)$$

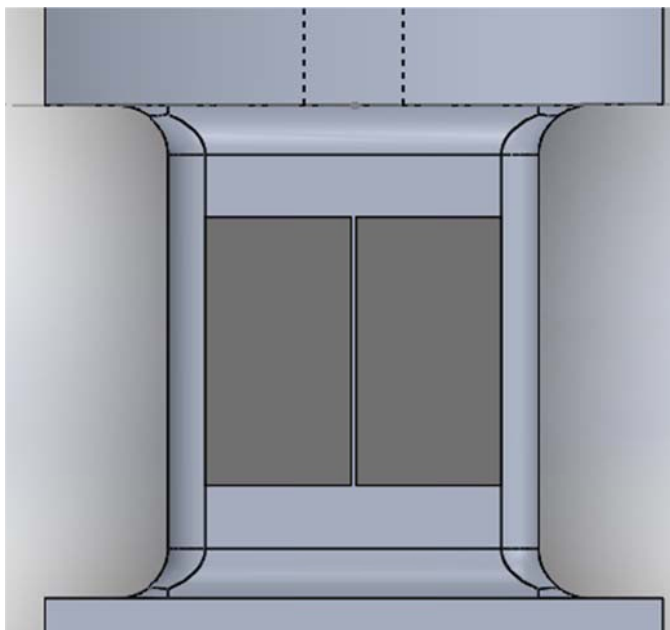
Iz Hookeova zakona dobivamo iznos deformacije

$$\varepsilon_I = \frac{\sigma_I}{E_{Al}} = \frac{4,74}{72000} = 6,58 \cdot 10^{-5} = 0,06583 \frac{\text{mm}}{\text{m}}. \quad (8.21)$$

Za Wheatstoneov mjerni polu most faktor mosta $B = 2$. Sada prema jednadžbi (4.8) dobivamo iznos signala

$$\left(\frac{U_A}{U_E} \right)_1 = \frac{k}{4} \cdot B \cdot |\varepsilon| = \frac{2}{4} \cdot 2 \cdot |0,06583| = 0,06583 \frac{\text{mV}}{\text{V}}. \quad (8.22)$$

Kao što je prikazano na (Slika 32) moguće je smjestiti i dvije trake **1-LY43-3/350** jednu do druge što omogućava korištenje pune izvedbe Wheatstoneovog mjernog mosta.



Slika 32: Prikaz smještaja odabranih traka

Za Wheatstoneov puni most faktor mosta $B = 4$. Sada prema jednadžbi (4.8) dobivamo iznos signala

$$\left(\frac{U_A}{U_E}\right)_I = \frac{k}{4} \cdot B \cdot |\varepsilon| = \frac{2}{4} \cdot 4 \cdot |0,06583| = 0,13166 \frac{\text{mV}}{\text{V}}. \quad (8.23)$$

8.3.2. *Provjera osjetljivosti na segmentu II uslijed djelovanja horizontalne sili i momenta sile oko vertikalne osi*

Kako segment 1 i 2 imaju isti poprečni presjek vrijedi

$$W_I = W_{II} = W. \quad (8.24)$$

Prema jednadžbi (8.1) naprežanje u segmentu iznosi

$$\sigma_{II} = \frac{M_{f_2}}{W_{II}} = \frac{M_Z - N \cdot \frac{l}{2}}{W_{II}} = \frac{1,5 \cdot 1000 - 15 \cdot 50}{474,202} = 1,58 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (8.25)$$

Iz Hookeova zakona dobivamo iznos deformacije

$$\varepsilon_{II} = \frac{\sigma_{II}}{E_{Al}} = \frac{1,58}{72000} = 2,1944 \cdot 10^{-5} = 0,021983 \frac{\text{mm}}{\text{m}}. \quad (8.26)$$

Za Wheatstoneov mjerni polu most faktor mosta $B = 2$. Sada prema jednadžbi (4.8) dobivamo iznos signala

$$\left(\frac{U_A}{U_E}\right)_{II} = \frac{k}{4} \cdot B \cdot |\varepsilon| = \frac{2}{4} \cdot 2 \cdot |0,021983| = 0,021983 \frac{\text{mV}}{\text{V}}. \quad (8.27)$$

Za Wheatstoneov puni most faktor mosta $B = 4$. Sada prema jednadžbi (4.8) dobivamo iznos signala

$$\left(\frac{U_A}{U_E}\right)_{II} = \frac{k}{4} \cdot B \cdot |\varepsilon| = \frac{2}{4} \cdot 4 \cdot |0,021983| = 0,043966 \frac{\text{mV}}{\text{V}}. \quad (8.28)$$

8.3.3. Provjera osjetljivosti na segmentu I i II uslijed djelovanja horizontalne sile

Kako su oba presjeka istih dimenzija, a $l_1 = l_2$

prema jednadžbi (8.1) naprezanje u segmentu 1 i 2 iznose

$$\sigma_{I,II} = \pm \frac{M_{f_{1,2}}}{W} = \frac{N \cdot \frac{l}{2}}{W} = \frac{15 \cdot 50}{474,202} = \pm 1,58 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (8.29)$$

Iz Hookeova zakona dobivamo iznos deformacije

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_{Al}} = \frac{1,58}{72000} = 2,19 \cdot 10^{-5} = 0,021948 \frac{\text{mm}}{\text{m}}. \quad (8.30)$$

Za Wheatstoneov mjerni polu most faktor mosta $B = 2$. Sada prema jednadžbi (4.8) dobivamo iznos signala

$$\left(\frac{U_A}{U_E} \right)_{I,II} = \frac{k}{4} \cdot B \cdot |\varepsilon| = \frac{2}{4} \cdot 2 \cdot |0,02194| = 0,02194 \frac{\text{mV}}{\text{V}}. \quad (8.31)$$

Za Wheatstoneov puni most faktor mosta $B = 4$. Sada prema jednadžbi (4.8) dobivamo iznos signala

$$\left(\frac{U_A}{U_E} \right)_{I,II} = \frac{k}{4} \cdot B \cdot |\varepsilon| = \frac{2}{4} \cdot 4 \cdot |0,021944| = 0,04389 \frac{\text{mV}}{\text{V}}. \quad (8.32)$$

8.3.4. *Provjera osjetljivosti na segmentima I i II uslijed djelovanja momenta sile oko vertikalne osi*

Prema jednadžbi (8.1) naprezanje u segmentu

$$\sigma_{I,II} = \frac{M_z}{W} = \frac{1,5 \cdot 1000}{474,202} = 3,1632 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (8.33)$$

Iz Hookeova zakona dobivamo iznos deformacija

$$\varepsilon_{I,II} = \frac{\sigma_I}{E_{Al}} = \frac{3,1632}{72000} = 4,39 \cdot 10^{-5} = 0,04393 \frac{\text{mm}}{\text{m}}. \quad (8.34)$$

Za Wheatstoneov mjerni polu most faktor mosta $B = 2$. Sada prema jednadžbi (4.8) dobivamo iznos signala

$$\left(\frac{U_A}{U_E} \right)_{I,II} = \frac{k}{4} \cdot B \cdot |\varepsilon| = \frac{2}{4} \cdot 2 \cdot |0,043933| = 0,043933 \frac{\text{mV}}{\text{V}}. \quad (8.35)$$

Za Wheatstoneov puni most faktor mosta $B = 4$. Sada prema jednadžbi (4.8) dobivamo iznos signala

$$\left(\frac{U_A}{U_E} \right)_{I,II} = \frac{k}{4} \cdot B \cdot |\varepsilon| = \frac{2}{4} \cdot 4 \cdot |0,043933| = 0,08786 \frac{\text{mV}}{\text{V}}. \quad (8.36)$$

Vidljivo je kako je iznos signala veći uslijed opterećenja momenta sile, a manja uslijed opterećenja silom zbog dužine l koja je ograničena zbog dostupnog prostora.

Također je potrebno primijetiti kako je iznos signala ispod 0.1 mV/V što nije optimalno, ali ipak se takvi iznosi signala daju pojačati mjernim pojačalom. Eventualni problem prilikom pojačanja malih iznosa signala je što postoji mogućnost da se uslijed pojačanja pojačaju i smetnje. Provjera mjerne osjetljivosti na segmentima za opterećenje uslijed djelovanja vertikalne sile i momenta sile oko poprečne osi nisu prikazani jer se zbog kvadratnog poprečnog presjeka i identičnih iznosa opterećenja rezultati podudaraju.

8.4. Provjera mjerne osjetljivosti segmenata uslijed deset puta većeg iznosa opterećenja

8.4.1. Provjera osjetljivosti na segmentu I uslijed djelovanja horizontalne sile i momenta sile oko vertikalne osi

Zadano je:

$$M_z = 15 \text{ Nm} \quad k = 2 \quad (8.37)$$

$$N = F_x = F_y = F_z = 150 \text{ N}. \quad (8.38)$$

Prema [7] modul elastičnosti za aluminij iznosi

$$E_{Al} = 72000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (8.39)$$

Prema jednadžbi (8.1) naprezanje u segmentu I iznosi

$$\sigma_1 = \frac{M_{f_1}}{W_1} = \frac{M_z + N \cdot \frac{l}{2}}{W_1} = \frac{15 \cdot 1000 + 150 \cdot 50}{474,202} = 47,44 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (8.40)$$

Iz Hookeova zakona dobivamo iznos deformacije

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_{Al}} = \frac{47,4}{72000} = 6,58 \cdot 10^{-4} = 0,6583 \frac{\text{mm}}{\text{m}}. \quad (8.41)$$

Za Wheatstoneov mjerni polu most faktor mosta $B = 2$. Sada prema jednadžbi (4.8) dobivamo iznos signala

$$\left(\frac{U_A}{U_E} \right)_1 = \frac{k}{4} \cdot B \cdot |\varepsilon| = \frac{2}{4} \cdot 2 \cdot |0,6583| = 0,6583 \frac{\text{mV}}{\text{V}}. \quad (8.42)$$

Za Wheatstoneov puni most faktor mosta $B = 4$. Sada prema jednadžbi (4.8) dobivamo iznos signala

$$\left(\frac{U_A}{U_E} \right)_1 = \frac{k}{4} \cdot B \cdot |\varepsilon| = \frac{2}{4} \cdot 4 \cdot |0,6583| = 1,3166 \frac{\text{mV}}{\text{V}}. \quad (8.43)$$

8.4.2. *Provjera osjetljivosti na segmentu II uslijed djelovanja horizontalne sile i momenta sile oko vertikalne osi*

Kako segment I i II imaju isti poprečni presjek

$$W_I = W_{II} = W$$

prema jednadžbi (8.1) naprezanje u segmentu I iznose

$$\sigma_{II} = \frac{M_{f_2}}{W_{II}} = \frac{M_z - N \cdot \frac{l}{2}}{W_{II}} = \frac{15 \cdot 1000 - 150 \cdot 50}{474,202} = 15,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (8.44)$$

Iz Hookeova zakona dobivamo

$$\varepsilon_{II} = \frac{\sigma_{II}}{E_{Al}} = \frac{15,8}{72000} = 2,1944 \cdot 10^{-4} = 0,21983 \frac{\text{mm}}{\text{m}}. \quad (8.45)$$

Za Wheatstoneov mjerni polu most faktor mosta $B = 2$. Sada prema jednadžbi (4.8) dobivamo iznos signala

$$\left(\frac{U_A}{U_E} \right)_{II} = \frac{k}{4} \cdot B \cdot |\varepsilon| = \frac{2}{4} \cdot 2 \cdot |0,21983| = 0,21983 \frac{\text{mV}}{\text{V}}. \quad (8.46)$$

Za Wheatstoneov puni most faktor mosta $B = 4$. Sada prema jednadžbi (4.8) dobivamo iznos signala

$$\left(\frac{U_A}{U_E} \right)_{II} = \frac{k}{4} \cdot B \cdot |\varepsilon| = \frac{2}{4} \cdot 4 \cdot |0,21983| = 0,43966 \frac{\text{mV}}{\text{V}}. \quad (8.47)$$

8.4.3. Provjera osjetljivosti na segmentu I i II uslijed djelovanja horizontalne sile

Kako su oba presjeka istih dimenzija, a $l_1 = l_2$

prema jednadžbi (8.1) naprezanje u segmentu I i II iznose

$$\sigma_{I,II} = \pm \frac{M_{f_{1,2}}}{W} = \frac{N \cdot \frac{l}{2}}{W} = \frac{150 \cdot 50}{474,202} = \pm 15,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (8.48)$$

Iz Hookeova zakona dobivamo

$$\varepsilon_I = \frac{\sigma_I}{E_{Al}} = \frac{15,8}{72000} = 2,19 \cdot 10^{-4} = 0,21948 \frac{\text{mm}}{\text{m}}. \quad (8.49)$$

Za Wheatstoneov mjerni polu most faktor mosta $B = 2$. Sada prema jednadžbi (4.8) dobivamo iznos signala

$$\left(\frac{U_A}{U_E} \right)_{I,II} = \frac{k}{4} \cdot B \cdot |\varepsilon| = \frac{2}{4} \cdot 2 \cdot |0,2194| = 0,2194 \frac{\text{mV}}{\text{V}}. \quad (8.50)$$

Za Wheatstoneov puni most faktor mosta $B = 4$. Sada prema jednadžbi (4.8) dobivamo iznos signala

$$\left(\frac{U_A}{U_E} \right)_{I,II} = \frac{k}{4} \cdot B \cdot |\varepsilon| = \frac{2}{4} \cdot 4 \cdot |0,21944| = 0,4389 \frac{\text{mV}}{\text{V}}. \quad (8.51)$$

8.4.4. *Provjera osjetljivosti na segmentima I i II uslijed djelovanja momenta sile oko vertikalne osi*

Prema jednadžbi (8.1) naprezanje u segmentu I i II iznose

$$\sigma_{I,II} = \frac{M_Z}{W} = \frac{15 \cdot 1000}{474,202} = 31,632 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (8.52)$$

Iz Hookeova zakona dobivamo

$$\varepsilon_I = \frac{\sigma_I}{E_{Al}} = \frac{3,1632}{72000} = 4,39 \cdot 10^{-4} = 0,4393 \frac{\text{mm}}{\text{m}}. \quad (8.53)$$

Za Wheatstoneov mjerni polu most faktor mosta $B = 2$. Sada prema jednadžbi (4.8) dobivamo iznos signala

$$\left(\frac{U_A}{U_E} \right)_{I,II} = \frac{k}{4} \cdot B \cdot |\varepsilon| = \frac{2}{4} \cdot 2 \cdot |0,43933| = 0,43933 \frac{\text{mV}}{\text{V}}. \quad (8.54)$$

Za Wheatstoneov puni most faktor mosta $B = 4$. Sada prema jednadžbi (4.8) dobivamo iznos signala

$$\left(\frac{U_A}{U_E} \right)_{I,II} = \frac{k}{4} \cdot B \cdot |\varepsilon| = \frac{2}{4} \cdot 4 \cdot |0,43933| = 0,8786 \frac{\text{mV}}{\text{V}}. \quad (8.55)$$

Vidljivo je kako će za deset puta veća opterećenja mjerna osjetljivost biti unutar preporučenih granica mjerne osjetljivosti

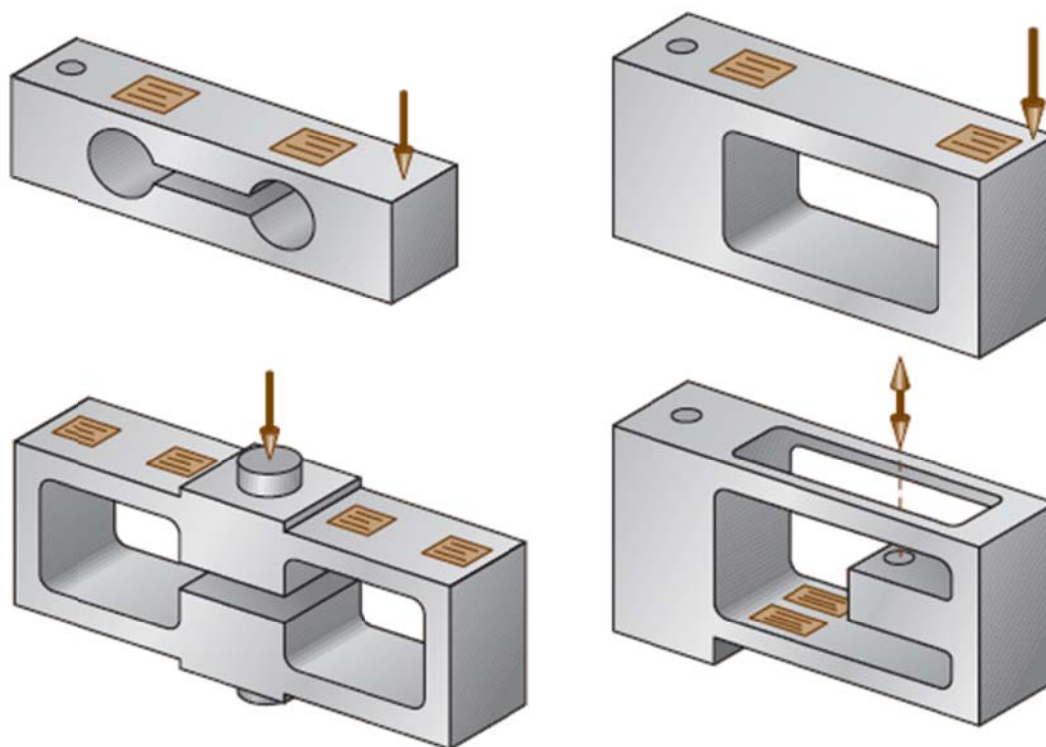
9. KONSTRUIRANJE SREDIŠNJEG SEGMENTA ZA MJERENJE AKSIJALNOG OPTEREĆENJA

Mjerenje aksijalne sile zahtjeva mnogo pažnje. Važno je napomenuti kako je aksijalna sila najčešće puno manja od u odnosu na ostale sile i momente te zbog toga mjerna osjetljivost aksijalnog segmenta vage mora biti visoka. Posljedica visoke osjetljivosti je što je aksijalni dio podložan utjecajima uzrokovanih ostalim komponentama sila. Kako bi se smanjio utjecaj ostalih komponenta sila najviše vremena i novca utroši se na razvoj aksijalnog segmenta vage.

[[11]]

9.1. Uvid u postojeće principe i rješenja

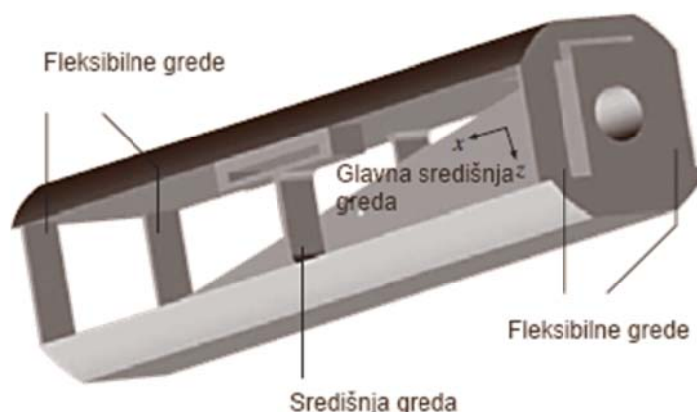
Kako bismo lakše osmislili geometriju središnjeg aksijalnog dijela prvo ćemo razmotriti postojeće mjerne pretvornike. Neki od postojećih mjernih pretvornika prikazani su na (Slika 33).



Slika 33: Postojeće mjerne doze [11]

Možemo uočiti da su ovakvi tipovi mjernih pretvornika najčešće sastavljeni od dvije ili više greda povezanih u paralelogram. Prilikom opterećenja silom dolazi do savijanja greda na kojima se nalaze naliježljene tenzometarske trake. Na taj način uz isti iznos sile povećanjem dužina greda i smanjivanjem poprečnog presjeka greda može se dobiti veći moment savijanja u gredama, a time i veća mjerna osjetljivost.

Prema [11] prilikom konstruiranja aksijalnog segmenta moramo obratiti pažnju pri formiranju geometrije. Na (Slika 34) prikazan je primjer aksijalnog segment vage. Lijeva i desna strana slike povezana su fleksibilnim gredama (*Flexures*). Te fleksibilne grede prenose znatan dio opterećenja ali su relativno fleksibilna prilikom djelovanja aksijalnog opterećenja. Najveći dio opterećenja prenosi se konzolnom gredom smještenom u središtu segmenta (*Main beam*). Mjerenja aksijalne sile najbolje se provodi na središnjoj gredi zato što su interakcije uslijed djelovanja ostalih komponenata minimalne.



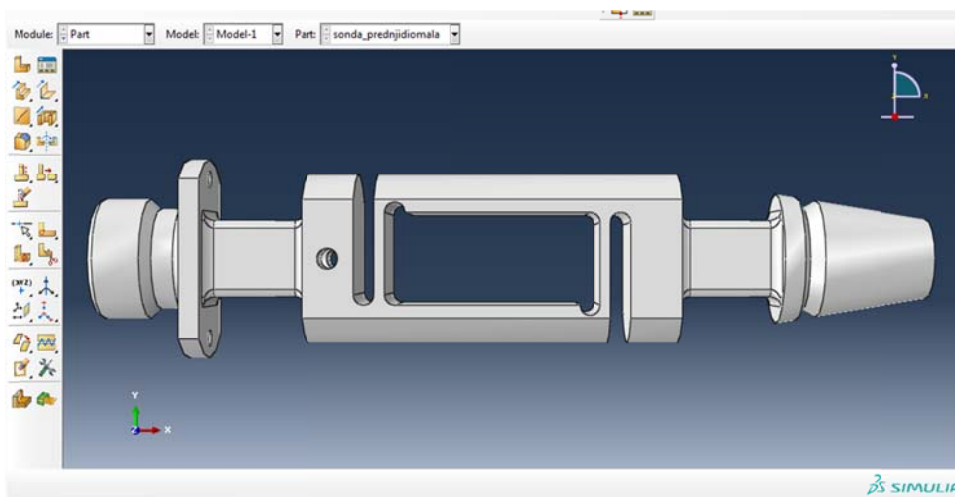
Slika 34: Primjer aksijalnog segmenta vage

Kako je geometrija aksijalnog segmenta kompleksnog oblika iznosi deformacija prilikom aksijalnog opterećenja izračunat će se u programskom paketu Abaqus primjenom metode konačnih elemenata.

9.2. Izračun u programskom paketu Abaqus

9.2.1. Generiranje geometrije

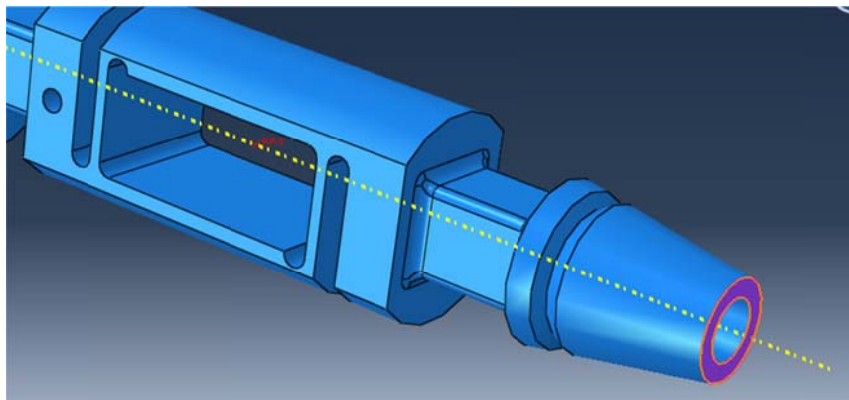
Prvo je generirana geometrija vage. Izgled generirane geometrije vage prikazan je na (Slika 35).



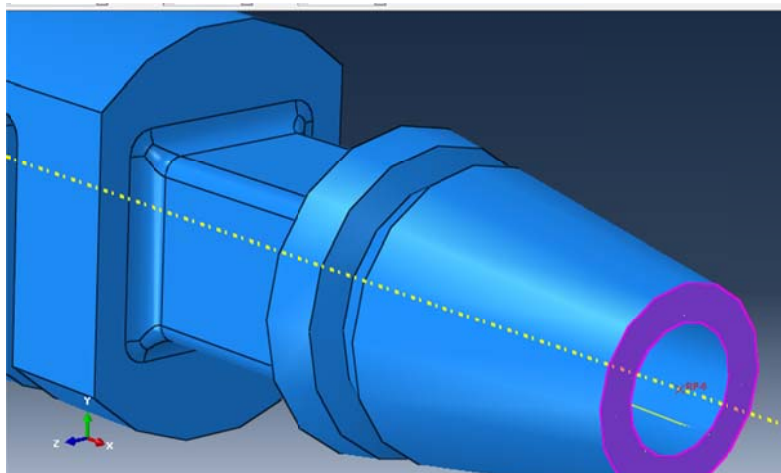
Slika 35: geometrija vage

9.2.2. Zadavanje referentnih točaka za opterećenje

Nakon generiranja geometrije zadane su karakteristike materijala; Youngov modul elastičnosti $E_{Al} = 72000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ i Poissonov koeficijent $\nu = 0,33$ za odabrani materijal (aluminij). Potom smo zadali referentne točke djelovanja opterećenja koje su nužne za pravilan način opterećenja u programskom paketu Abaqus. Zadane referentne točke su prikazane na (Slika 36) i (Slika 37).

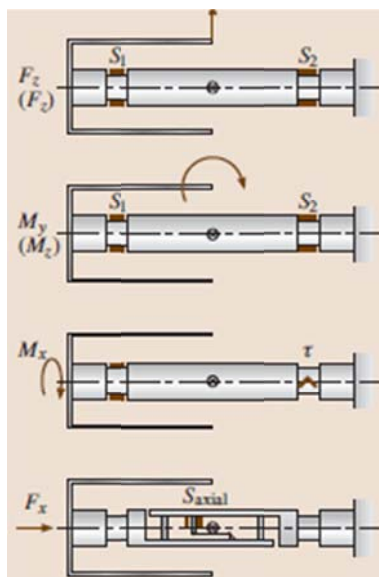


Slika 36: središnja referentna točka



Slika 37:referentna točka na prednjoj strani

Referentne točke povezane su krutom kinematskom vezom za prednju cilindričnu površinu. Na taj način omogućeno je opterećivanje geometrije vage u programskom paketu na identičan način kao na (Slika 38).



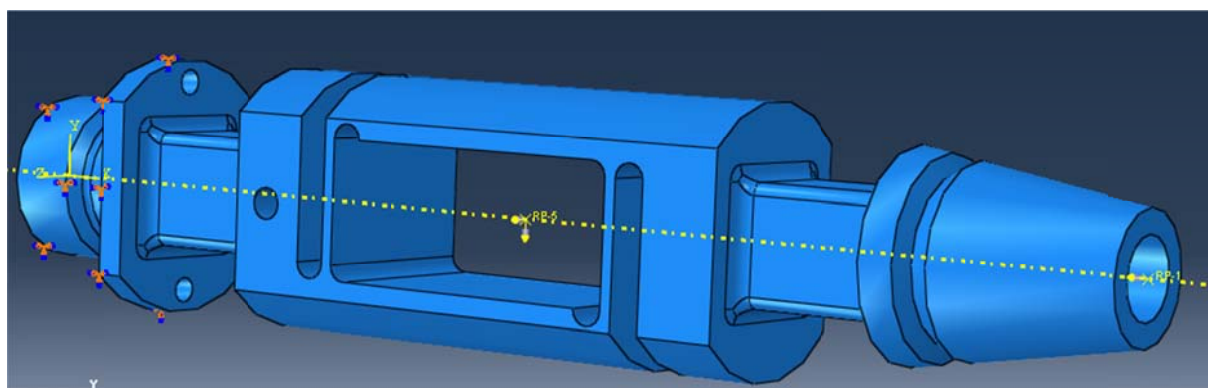
Slika 38: Opterećenja vage

U (Tablica 3) prikazani su minimalno potrebni iznosi sila i momenata sila da bi vaga mogla mjeriti. Orijentacija sila i momenata sila dana je prema koordinatnom sustavu prikazanom na (Slika 4).

Tablica 3: Minimalni iznosi svih sila i momenata

Koordinatni sustav vage	Naziv komponente	Iznos [N/Nm]
$X \quad F_x$	Aksijalna sila	15
$Y \quad F_y$	Bočna sila	15
$Z \quad F_z$	Normalna sila	15
M_x	Moment oko uzdužne osi	1,5
M_y	Moment oko poprečne osi	1,5
M_z	Moment oko vertikalne osi	1,5

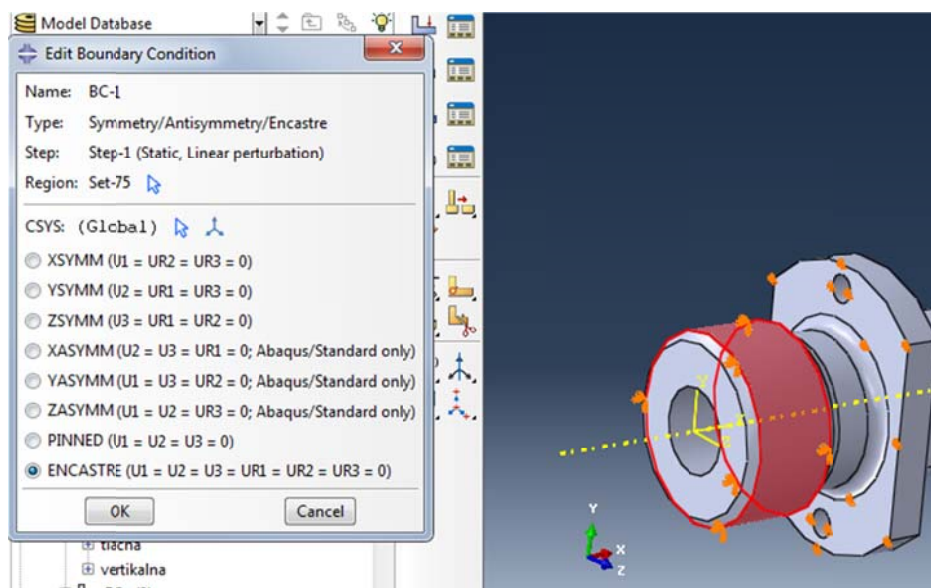
Sile F_y , F_z te momenti sile M_z i M_y djeluju u središnjoj referentnoj točki, a sila F_x i moment sile M_x djeluju u prednjoj referentnoj točki. Na (Slika 39) prikazana su opterećenja na referentne točke.



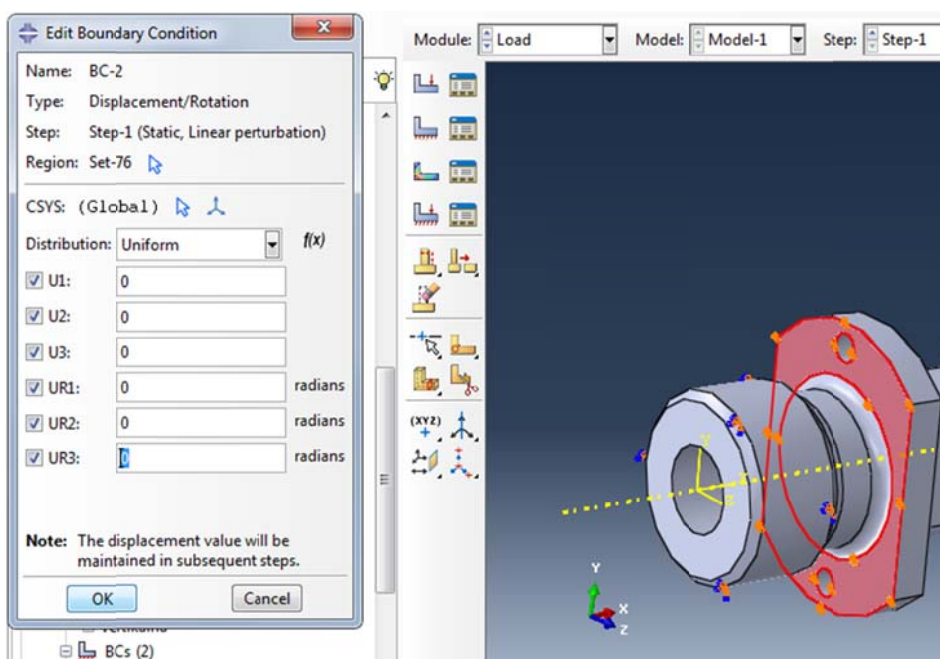
Slika 39: Sva opterećenja na vagu u programskom paketu Abaqus

9.2.3. Generiranje rubnih uvjeta pomaka

Nakon toga odredili smo rubne uvijete pomaka. Kako se vaga spaja navojem za idući segment na način da se ostvari i kontakt sa naslonom, a naslon ima dva mjesta predviđena za uvrtnje vijke koji imaju ulogu spriječiti odvrtanje tako povezanih segmenata generirani su rubni uvjeti pomaka prikazani na (Slika 40) i (Slika 41).



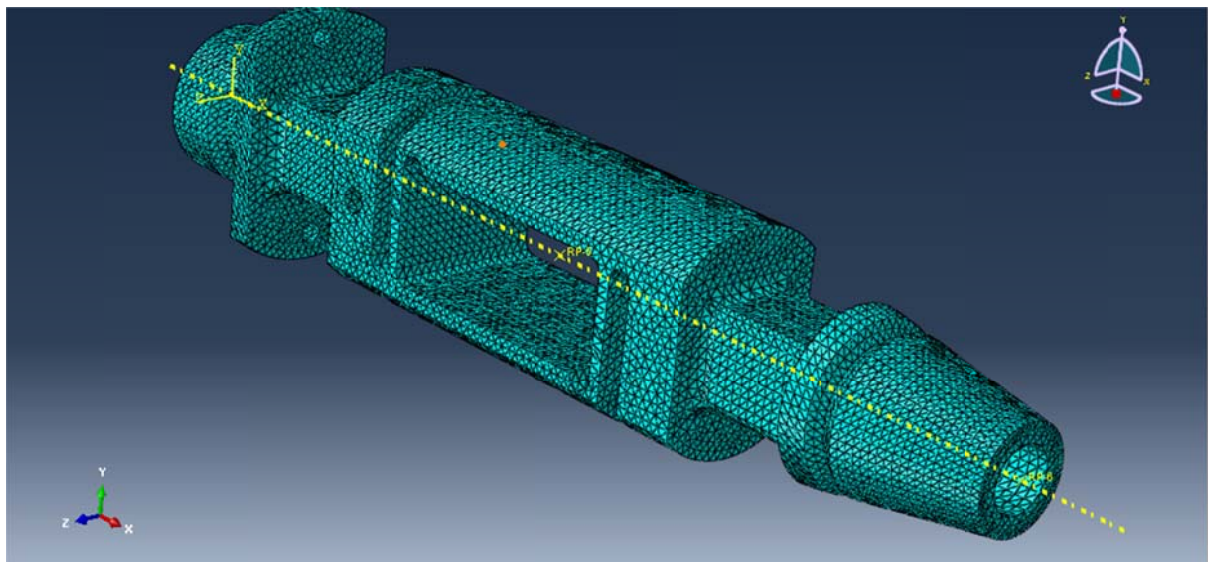
Slika 40: Rubni uvjeti pomaka na mjestu navoja



Slika 41: Rubni uvjeti pomaka na mjestu naslona

9.2.4. Diskretizacija geometrije konačnim elementima

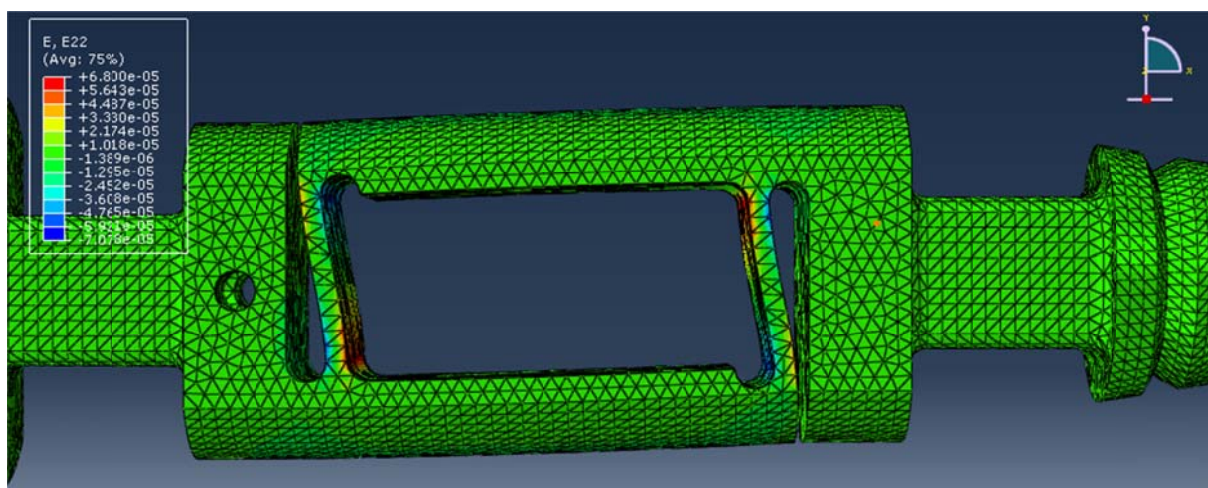
Geometrija vage diskretizirana je sa 41991 tetraedarskih konačnim elemenata oznake C3D10H 3D . Na (Slika 42) prikazana je diskretizirana geometrija .



Slika 42: Diskretizirana geometrija vage

9.2.5. Izračun mjerne osjetljivosti

Kako bismo izračunali iznos odziva potrebno je očitati deformacije iz programskog paketa Abaqus uslijed opterećenja aksijalnom silom. Uslijed djelovanja navedene sile dolazi do deformacija geometrije vage prikazanih na (Slika 43).

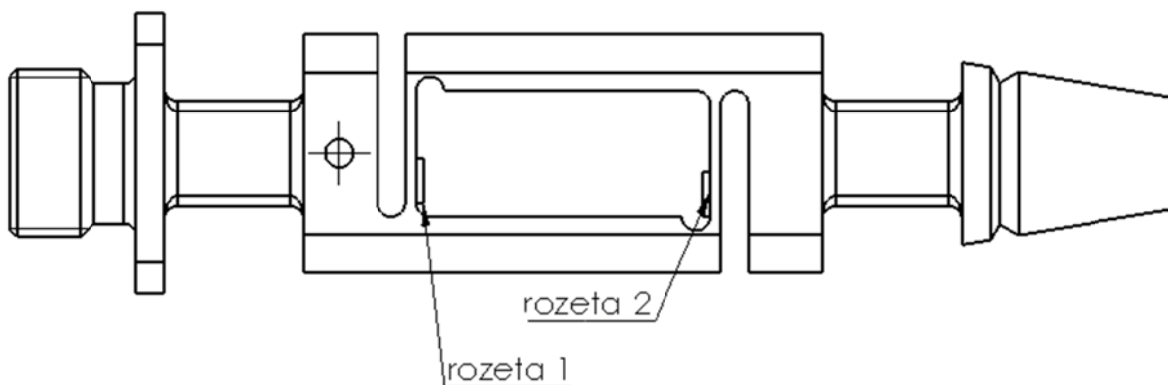


Slika 43: Deformirani oblik vage uslijed aksijalne sile

Uočavamo da deformacije u desnom donjem uglu odgovaraju deformacijama u desnom gornjem uglu središnjeg paralelograma i obratno. Tenzometarske **1-XY93-3/350** trake bit će

pozicionirane na unutarnje vertikalne plohe bočnih stranica središnjeg paralelograma tako da se os simetrije tenzometarske trake poklapa sa vertikalnom osi simetrije bočne stranice.

Na (Slika 44) prikazan je smještaj tenzometarskih traka .



Slika 44: Smještaj tenzometara

Potrebno je shematski prikazati raspored traka na bočnim stranicama i njihov način spajanje u Wheatstoneov most.



Slika 45: shema rozete 1



Slika 46: Shema rozete 2

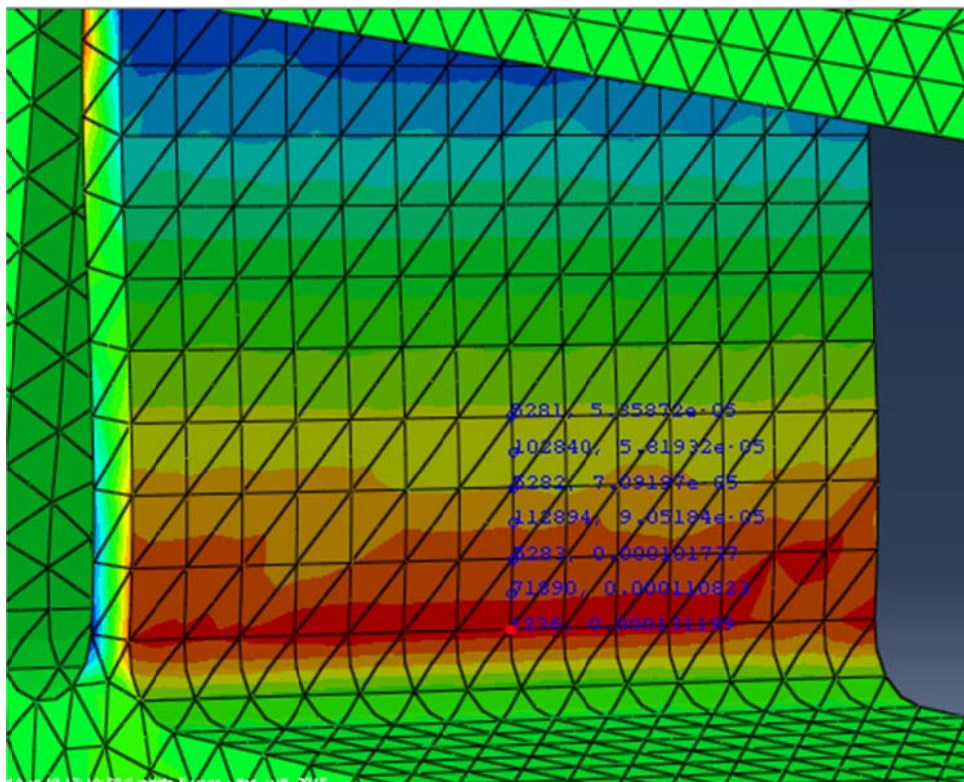
Za ovako pozicionirane i spojene trake iz jednadžbe (4.1) slijedi izraz

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4), \quad (9.1)$$

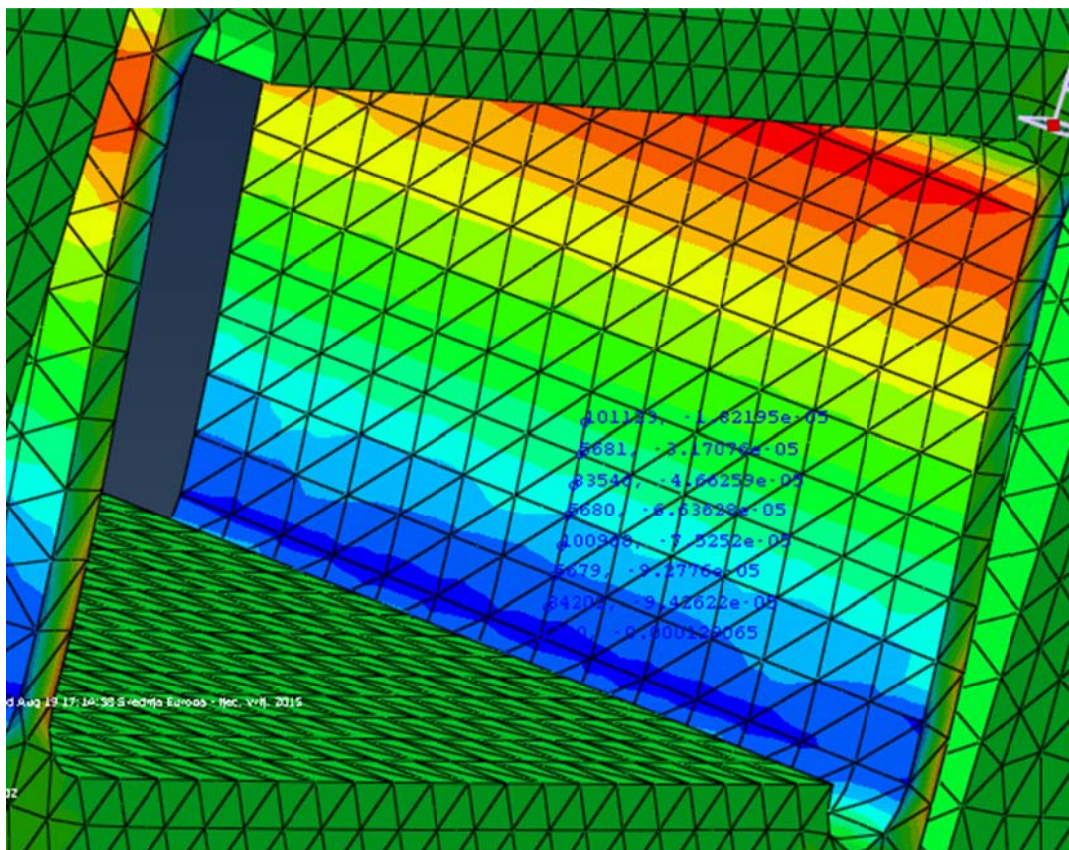
a iz početnih uvjeta: $\varepsilon_1 = \varepsilon_{r1}$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_{r2}$, $\varepsilon_3 = -\nu\varepsilon_{r2}$, $\varepsilon_4 = -\nu\varepsilon_{r1}$ daljnjim sređivanjem dobivamo

$$\begin{aligned} \frac{U_A}{U_E} &= \frac{k}{4}(\varepsilon_{r1} - \varepsilon_{r2} + (-\nu\varepsilon_{r2}) - (-\nu\varepsilon_{r1})) = \\ &= \frac{k}{4}(\varepsilon_{r1} - \varepsilon_{r2} - \nu\varepsilon_{r2} + \nu\varepsilon_{r1}). \end{aligned} \quad (9.2)$$

Nakon što smo odabrali smještaj i način spajanja tenzometarskih traka očitati ćemo iznose vertikalne komponente deformacija E_{22} u čvorovima konačnih elemenata smještenih na vertikalnoj osi simetrije bočnih stranica. Na (Slika 47) i (Slika 48) prikazana je putanja očitavanja, a iznosi očitanih deformacija na mjestu rozete 1 i 2 na (Slika 49) i (Slika 50).



Slika 47: Putanja očitavanja na mjestu rozete 1



Slika 48: Putanja očitavanja na mjestu rozete 2

E, E22
0.000131199
0.000110823
0.000101737
9.05184e-05
7.09197e-05
5.81932e-05
5.35872e-05

Slika 49: Iznosi deformacija za rozetu 1

E, E22
2.52656e-06
-0.000129065
-9.42622e-05
-9.2776e-05
-7.5252e-05
-6.63628e-05
-4.66259e-05
-3.17076e-05

Slika 50: Iznosi deformacija za rozetu 2

Sad je potrebno izračunati prosječnu vrijednost vertikalne komponente deformacije za rozetu 1 i 2 koje iznose

$$\begin{aligned}\varepsilon_{r1} &= \frac{(1,31199 + 1,10823 + 1,01737) \cdot 10^{-4} + (9,052 + 7,0919 + 5,8193 + 5,358) \cdot 10^{-5}}{7} = \\ &= 8,81358 \cdot 10^{-5} = 0,081358 \frac{\text{mm}}{\text{m}},\end{aligned}\quad (9.3)$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{r2} &= \frac{(-1,2906) \cdot 10^{-4} + (-9,426 - 9,2776 - 7,5252 - 6,63628 - 4,66259 - 3,1707) \cdot 10^{-5}}{7} = \\ &= -7,6578 \cdot 10^{-5} = -0,076578 \frac{\text{mm}}{\text{m}}.\end{aligned}\quad (9.4)$$

Za aluminij Poissonov koeficijent prema [7] iznosi

$$\nu = 0,33 \quad (9.5)$$

Uvrštavanjem zadanih vrijednosti u jednadžbu slijedi iznos signala

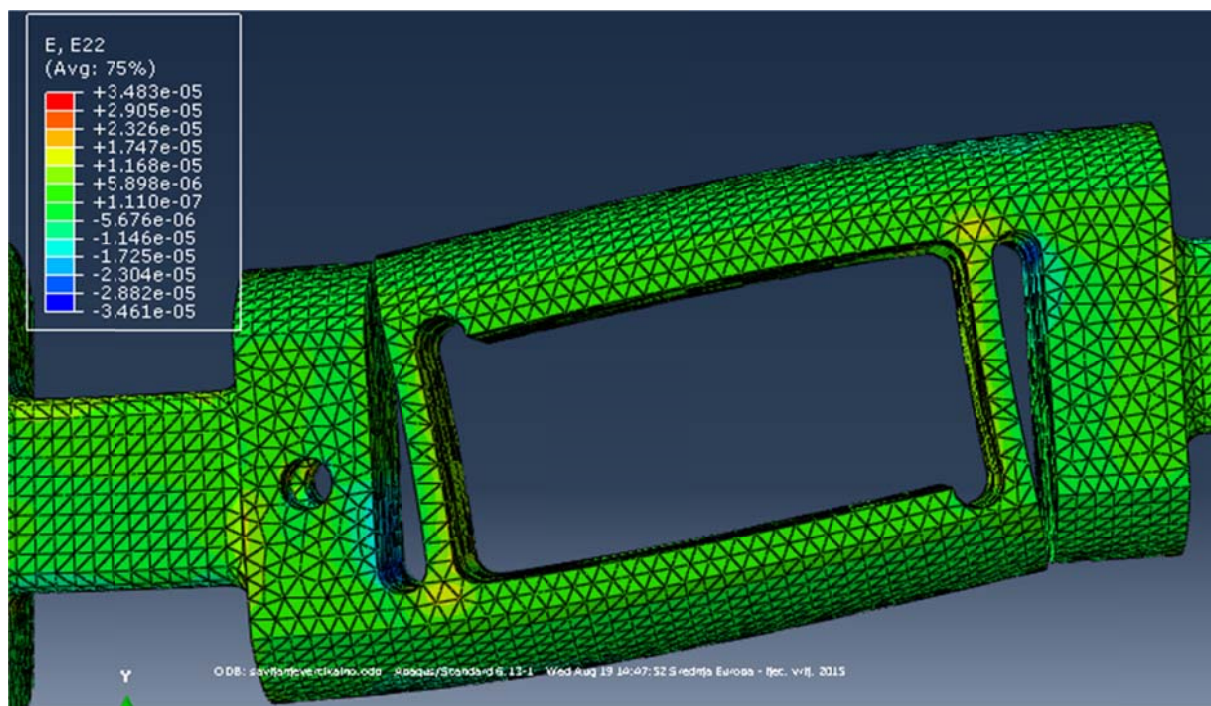
$$\begin{aligned}\frac{U_A}{U_E} &= \frac{k}{4} (\varepsilon_{r1} - \varepsilon_{r2} - \nu \varepsilon_{r2} + \nu \varepsilon_{r1}) = \\ &= \frac{2}{4} (0,081358 - (-0,076578) - 0,33 \cdot -0,076578 + 0,33 \cdot 0,081358) = \\ &= 0,105027 \frac{\text{mV}}{\text{V}}.\end{aligned}\quad (9.6)$$

Vidimo kako signal zadovoljava minimalne zahtjeve mjerne osjetljivosti.

9.2.6. Kompenzacija signala uslijed interakcije ostalih opterećenja

Sada je potrebno vidjeti moguće interakcije ostalih opterećenja na središnjem segmentu.

U našem slučaju najveći potencijal za smetnje uzrokovane interakcijom ima moment sile oko poprečne osi te vertikalna sila jer deformiraju središnji segment na sličan način kao i aksijalna sila. Na (Slika 51) prikazana je deformirani oblik.



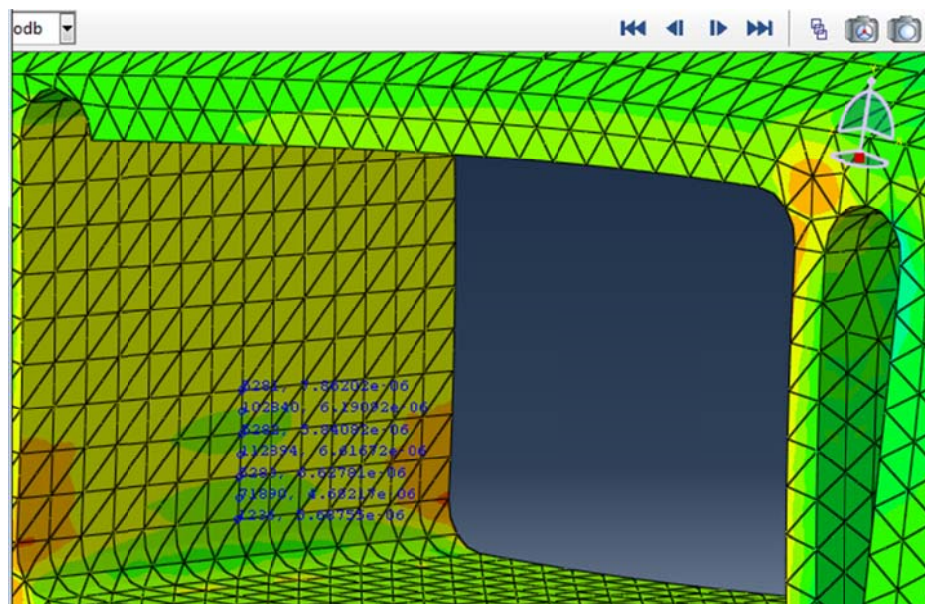
Slika 51: Deformirani oblik uslijed vertikalne sile i momenta sile oko poprečne osi

Detaljnijim uspoređivanjem deformiranih oblika prikazanih na (Slika 43) i (Slika 51) uočavamo da se predznaci deformacije na pozicijama lijepljenja rozeta uslijed aksijalne sile razlikuju od predznaka deformacije uslijed djelovanja vertikalne sile i momenta sile oko poprečne osi. Predznaci deformacije uslijed pojedinih opterećenja prikazani su u (Tablica 4).

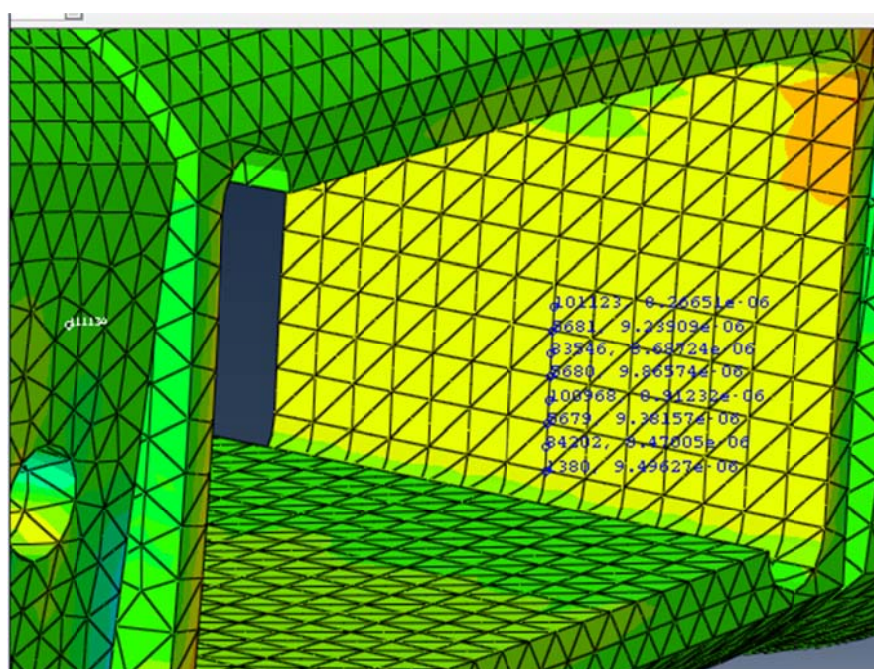
Tablica 4: Predznaci deformacije za različita opterećenja na mjestu 1 i 2

	rozeta 1	rozeta 2
Aksijalna sila	+	-
Vertikalna sila i moment sile oko poprečne osi	+	+

Sada je potrebno očitati iznose deformacija na mjestima rozete 1 i 2 .



Slika 52: Očitavanje iznosa deformacije na mjestu rozete 1



Slika 53: Očitavanje iznosa deformacije na mjestu rozete 2

Sad je potrebno ponovno izračunati prosječnu vrijednost vertikalne komponente deformacije za rozetu 1 i 2

$$\begin{aligned}\varepsilon_{r1} &= \frac{(5,68755 + 4,6821 + 6,6278 + 6,6167 + 5,8408 + 6,1909 + 7,8620) \cdot 10^{-6}}{7} = \\ &= 6,2154 \cdot 10^{-6} = 6,2154 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mm}}{\text{m}},\end{aligned}\quad (9.7)$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{r2} &= \frac{(9,4962 + 8,4700 + 9,3815 + 8,9123 + 9,8657 + 8,6872 + 9,2390) \cdot 10^{-6}}{7} = \\ &= 9,15027 \cdot 10^{-6} = 9,15027 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mm}}{\text{m}}.\end{aligned}\quad (9.8)$$

Uvrštavanjem zadanih vrijednosti u jednadžbu slijedi iznos signala mjerne osjetljivosti

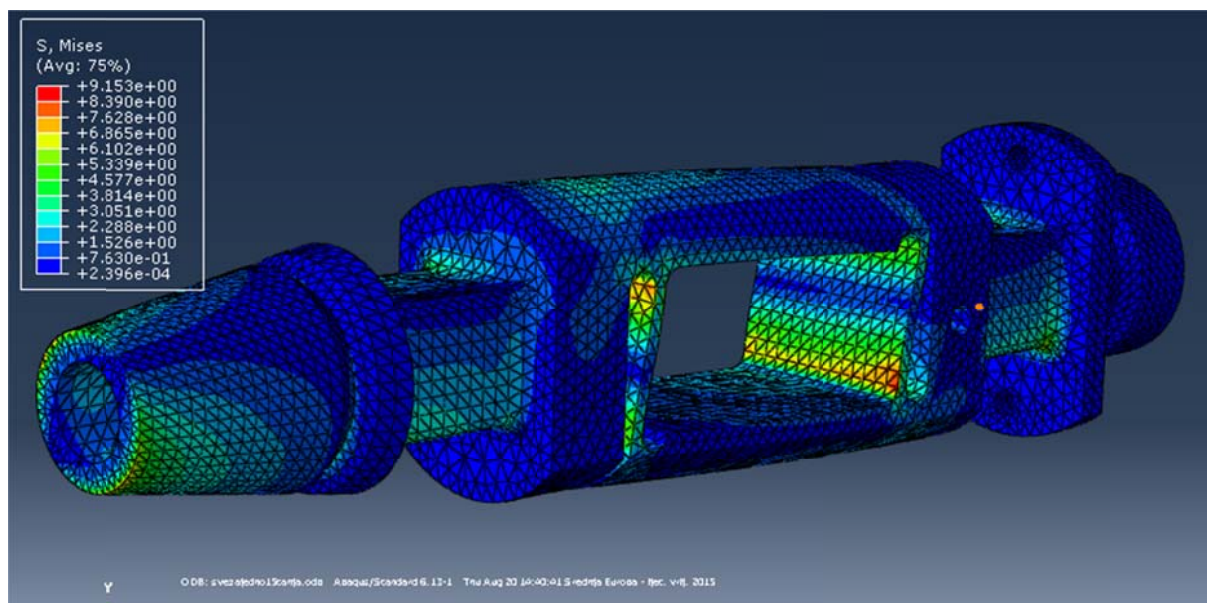
$$\begin{aligned}\frac{U_A}{U_E} &= \frac{k}{4}(\varepsilon_{r1} - \varepsilon_{r2} - \nu \varepsilon_{r2} + \nu \varepsilon_{r1}) = \\ &= \frac{2}{4}(6,2154 \cdot 10^{-3} - 9,15027 \cdot 10^{-3} - 0,33 \cdot 9,15027 \cdot 10^{-3} + 0,33 \cdot 6,2154 \cdot 10^{-3}) = \\ &= -0,001952 \frac{\text{mV}}{\text{V}}.\end{aligned}\quad (9.9)$$

Kao što vidimo iz rezultata za ovako pozicionirane spojene tenzometarske trake dolazi do relativno dobre kompenzacije signala uzrokovanih interakcijom vertikalne sile i momenta sile oko poprečne osi prilikom mjerenja aksijalne sile. Važno je napomenuti kako se ovi rezultati tretiraju kao orijentacijske vrijednosti.

9.2.7. Izračun ekvivalentnog naprezanja za minimalna opterećenja

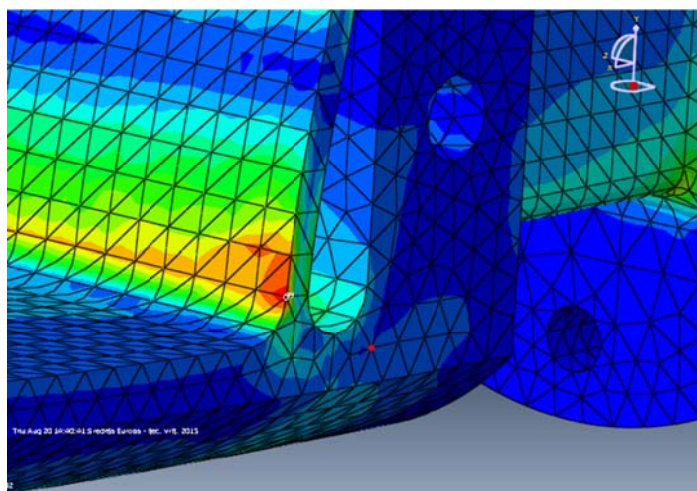
Potrebno je provjeriti čvrstoću vage za slučaj istovremenog djelovanja svih minimalnih opterećenja prikazanih u (Tablica 3).

Na (Slika 54) prikazana je raspodjela naprezanja za minimalna opterećenja.

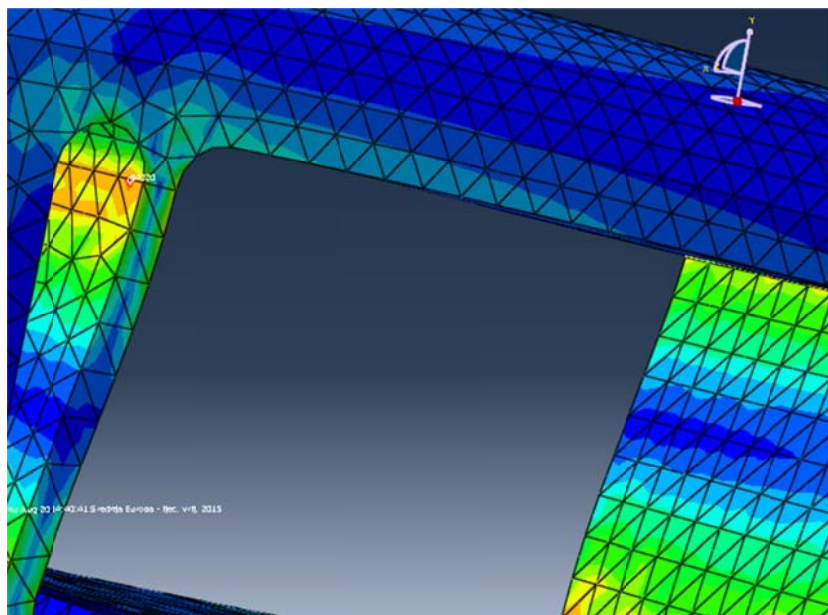


Slika 54: Ekvivalentna naprezanja za minimalna opterećenja

Maksimalna naprezanja pojavljuju se u središnjem segmentu na rubovima vanjskog i unutarnjeg dijela tankih stranica za mjerenje aksijalnog opterećenja. Mjesta maksimalnih naprezanja prikazana su na (Slika 55) i (Slika 56).



Slika 55: Mjesto maksimalnih naprezanja 1



Slika 56: Mjesto maksimalnih napreznja 2

Smanjenje napreznja na rubovima može se postići skidanjem oštih rubova po konturi paralelograma središnjeg segmenta

Iz [14] str 172 za AlZn5,5MgCu-T6 očitana je vrijednost konvencionalne granice tečenja

$$R_{p\,0,2} = 485 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (9.10)$$

Prema [15] str 39 za dopušteno napreznje za duktilne materijale vrijedi

$$\sigma_{dop} = \frac{R_{p\,0,2}}{S_{potrebno}} = \frac{485}{3} = 161.67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (9.11)$$

Kako je maksimalno ekvivalentno napreznje $\sigma_{ekv} = 9,153 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq \sigma_{dop}$ konstrukcija zadovoljava.

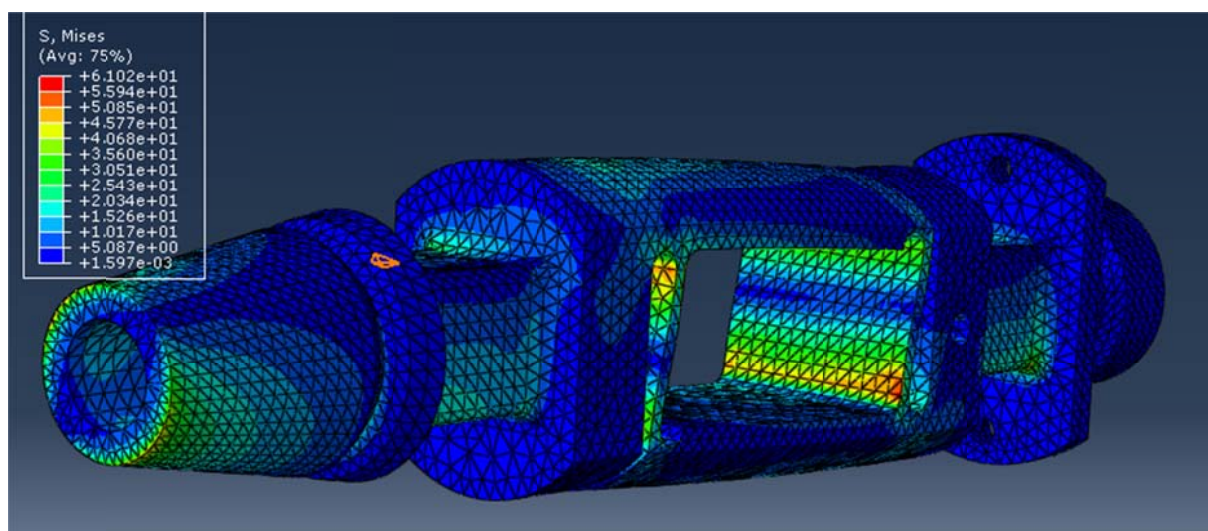
9.2.8. Izračun ekvivalentnog naprezanja za maksimalno opterećenje

Sada ćemo provjeriti čvrstoću za istovremeno djelovanje maksimalnih opterećenja čiji su iznosi navedeni u (Tablica 5) .

Tablica 5: Maksimalni iznosi opterećenja

Koordinatni sustav	Naziv komponente	Iznos [N/Nm]
X	Aksijalna sila	100
Y	Bočna sila	100
Z	Normalna sila	100
M_x	Moment oko uzdužne osi	10
M_y	Moment oko poprečne osi	10
M_z	Moment oko vertikalne osi	10

Raspodjela naprezanja za maksimalno opterećenja prikazana je pri čemu se maksimalni iznosi naprezanja ponovno pojavljuju na već navedenim kritičnim mjestima.



Slika 57: Raspodjela naprezanja za maksimalne iznose opterećenja

Prema [15] str 39 za dopušteno naprezanje za duktilne materijale vrijedi

$$\sigma_{dop} = \frac{R_{p\ 0,2}}{S_{potrebno}} = \frac{485}{3} = 161.67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (9.12)$$

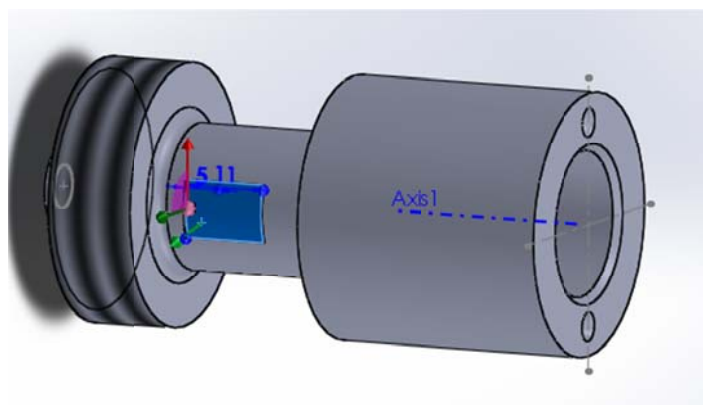
Kako je maksimalno ekvivalentno naprezanje $\sigma_{ekv} = 61 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq \sigma_{dop}$ konstrukcija zadovoljava.

10. KONSTRUIRANJE SEGMENTA ZA MJERENJE OPTEREĆENJA UVIJANJEM

Torzijski segment ima više uloga u sklopu vage za mjerenje arodinamičkih opterećenja. Mjerenje opterećenja nastalih isključivo opterećenjem na uvijanje, ulogu nosivog elementa koji omogućuje prihvat prednjeg skupa segmenata te prijenos svih opterećenja na mjesto prihvata vage za aerodinamičko opterećenje.

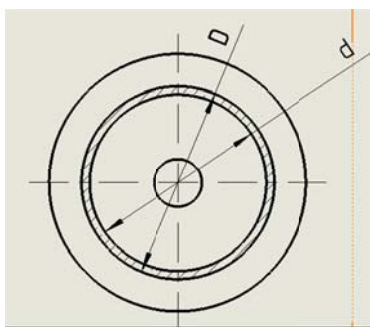
10.1. Generiranje geometrije

Zbog lakšeg pozicioniranja tenzometarskih traka i poznatih smjerova glavnih naprezanja prilikom opterećenja na uvijanje za mjerenje momenta torzije odabrana je cilindrična geometrija. Na slici (Slika 58) plavim pravokutnikom označena je pozicija i veličina tenzometarskih traka.



Slika 58: Geometrija torzijskog segmenta

Na (Slika 59) prikazane su dimenzije poprečnog presjeka segmenta na mjestu pozicioniranja tenzometarskih traka.



Slika 59: Dimenzije poprečnog presjeka

Očitane dimenzije:

$$D = 20 \text{ mm} \quad (10.1)$$

$$d = 18 \text{ mm}. \quad (10.2)$$

Potom izračunamo moment otpora uvijanju

$$W_t = \frac{\pi}{16} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D} = \frac{\pi}{16} \cdot \frac{20^4 - 18^4}{20} = 540,197 \text{ mm}^3. \quad (10.3)$$

10.2. Izračun očekivanog odziva

10.2.1. Izračun očekivanog odziva za minimalno opterećenje

Sada je potrebno izračunati iznos odziva za minimalno opterećenje za tako dimenzionirani segment.

$$M_t = 1,5 \text{ Nm} \quad (10.4)$$

Prema [7] modul elastičnosti i Poissonov koeficijent za aluminij iznose:

$$E_{Al} = 72000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (10.5)$$

$$\nu = 0,33. \quad (10.6)$$

Prema [6] modul smicanja iznosi

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{72000}{2(1+0,33)} = 27067,68 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (10.7)$$

Maksimalno smično naprezanje iznosi

$$\tau_{t\max} = \frac{M_t}{W_t} = \frac{1,5 \cdot 1000}{540,197} = 2,777 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (10.8)$$

Deformacija uslijed momenta uvijanja iznosi

$$\varepsilon = \frac{\tau_{xy}}{2G} = \frac{2,777}{2 \cdot 27067,68} = 5,1297 \cdot 10^{-5} = 0,051297 \frac{\text{mm}}{\text{m}}. \quad (10.9)$$

Prema jednadžbama (4.17), (4.16) i (4.13) slijedi iznos signala

$$\frac{U_A}{U_E} = k \cdot |\varepsilon| = 2 \cdot 0,051297 = 0,1026 \frac{\text{mV}}{\text{V}}. \quad (10.10)$$

Vidimo kako iznos signala pri minimalnom opterećenju zadovoljava minimalne zahtjeve mjerne osjetljivosti.

10.2.2. Izračun očekivanog odziva za maksimalno opterećenje

Sada je potrebno izračunati mjernu osjetljivost za maksimalno opterećenje za tako dimenzionirani segment.

Zadana je vrijednost momenta uvijanja

$$M_t = 10 \text{ Nm.} \quad (10.11)$$

Prema [7] modul elastičnosti i Poissonov koeficijent za aluminij iznose:

$$E_{Al} = 72000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (10.12)$$

$$\nu = 0,33. \quad (10.13)$$

Prema [6] modul smicanja iznosi

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{72000}{2(1+0,33)} = 27067,68 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (10.14)$$

Maksimalno smično naprezanje iznosi

$$\tau_{t\max} = \frac{M_t}{W_t} = \frac{10 \cdot 1000}{540,197} = 18,51 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (10.15)$$

Deformacija uslijed momenta uvijanja iznosi

$$\varepsilon = \frac{\tau_{xy}}{2G} = \frac{18,51}{2 \cdot 27067,68} = 3,419 \cdot 10^{-4} = 0,3419 \frac{\text{mm}}{\text{m}}. \quad (10.16)$$

Prema jednadžbama (4.17), (4.16) i (4.13) slijedi iznos signala

$$\frac{U_A}{U_E} = k \cdot |\varepsilon| = 2 \cdot 0,3419 = 0,6838 \frac{\text{mV}}{\text{V}}. \quad (10.17)$$

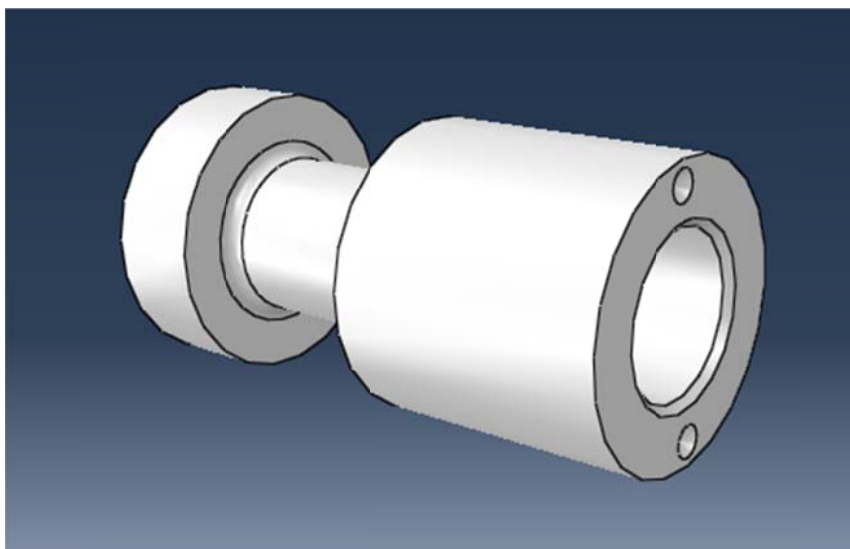
Vidimo kako iznos signala pri maksimalnom opterećenju nalazi unutar raspona zahtijevane mjerne osjetljivosti.

10.3. Izračun naprezanja u programskom paketu Abaqus

Izračun naprezanja vrši se u programskom paketu Abaqus 6,12

10.3.1. Generiranje geometrije torzijskog segmenta

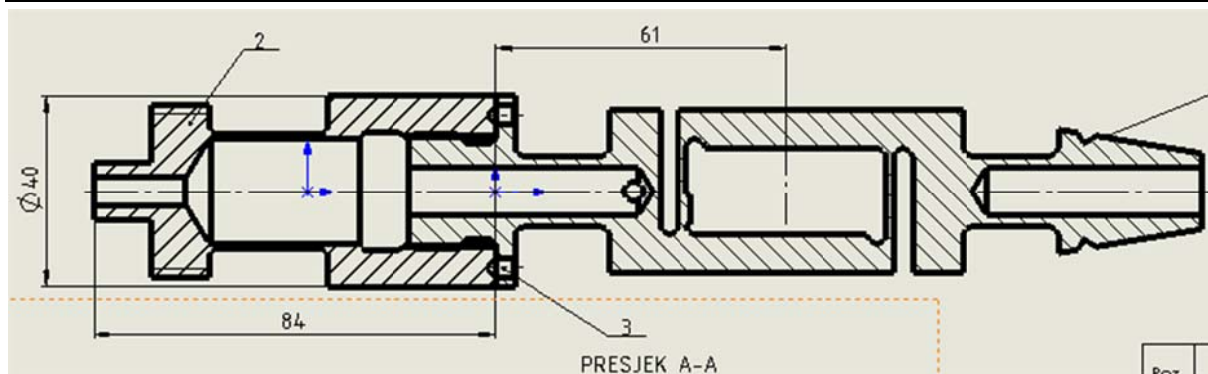
Prvo smo generirali geometriju. Nakon generiranja geometrije zadane su karakteristike materijala; Youngov modul elastičnosti $E_{Al} = 72000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ i Poissonov koeficijent $\nu = 0,33$ za odabrani materijal (aluminij).



Slika 60: generirana geometrija torzijskog segmenta

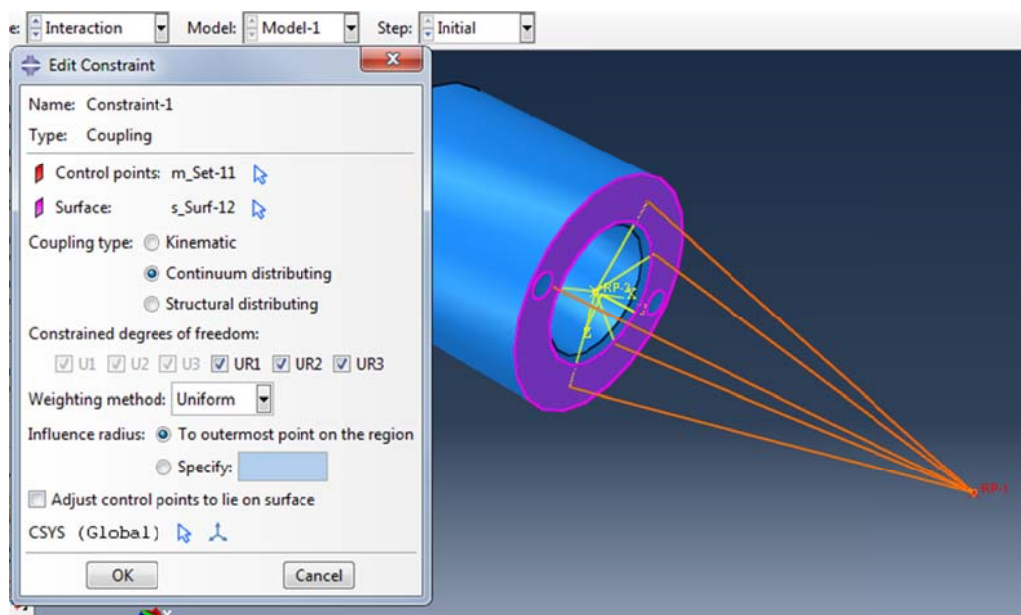
10.3.2. Generiranje referentnih točaka i opterećenja

Potom smo zadali referentne točke djelovanja opterećenja koje su nužne za pravilan način opterećenja tj. da način opterećenja odgovara stvarnoj situaciji. Zadane referentne točke su prikazane na (Slika 63). Kako torzijski segment biva opterećen u sklopu sa prednjim segmentima važno je da središnja referentna točka opterećenja bude na pravoj udaljenosti od čela torzijskog segmenta. Na (Slika 61) prikazana je udaljenost referentne točke 1 od torzijskog segmenta koja iznosi 61 mm.



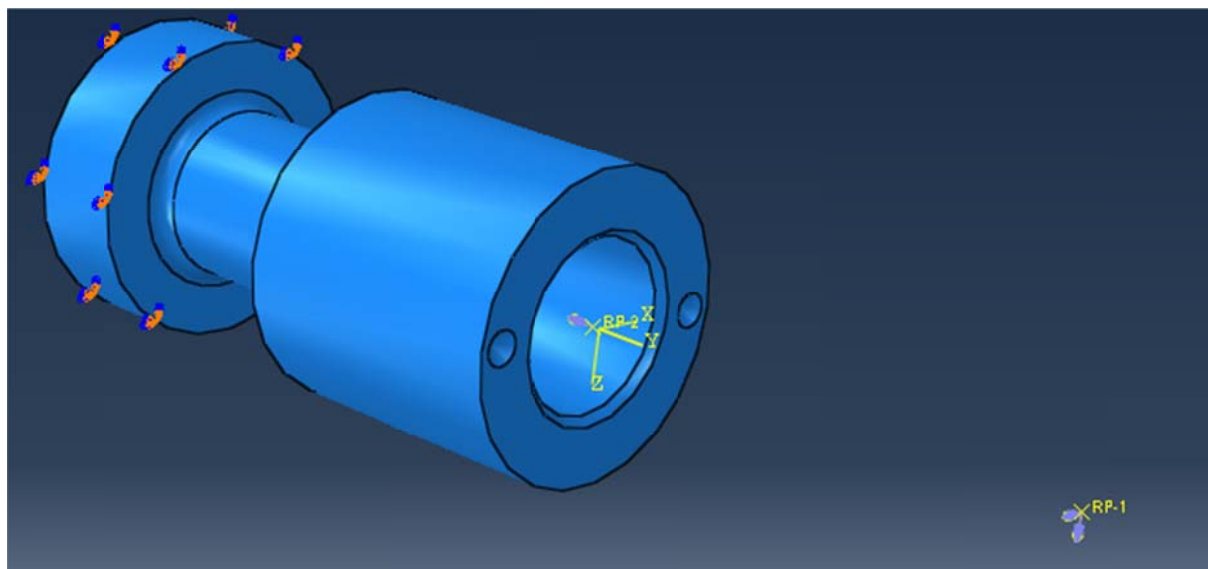
Slika 61: Udaljenost referentne točke od torzijskog segmenta

Postavljanje referentnih točaka i postavljanje veze sa čeonom površinom geometrije prikazano je na (Slika 62).



Slika 62: zadavanje rubnih uvjeta za referentnu točku 1

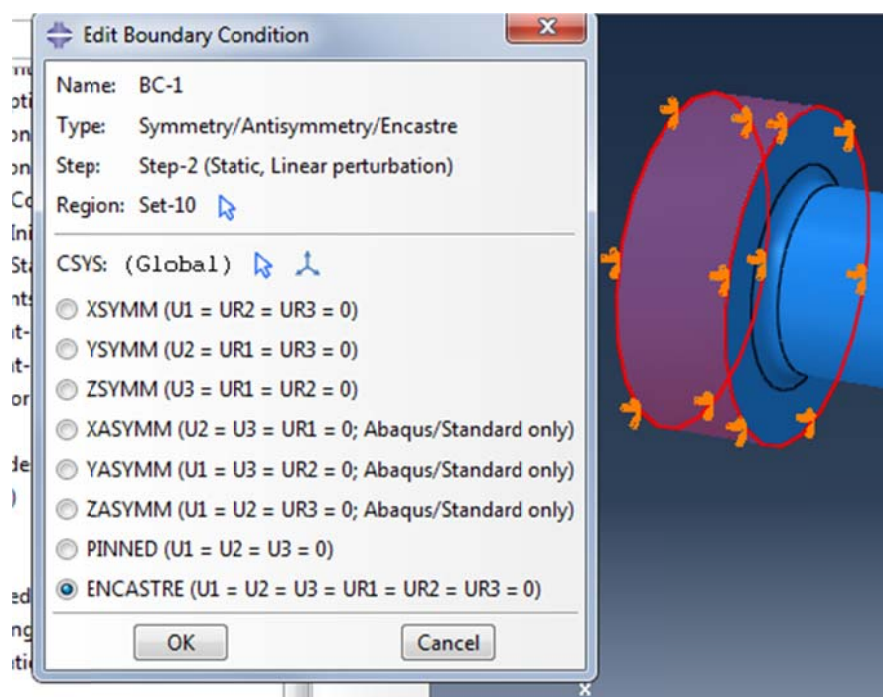
Sile F_y , F_z te momenti sile M_z i M_y djeluju u referentnoj točki 1, a sila F_x i moment sile M_x djeluju u referentnoj točki 2. Na (Slika 63) prikazan je model opterećen svim silama i momentima sile.



Slika 63: Sva opterećenja na model

10.3.3. Generiranje rubnih uvjeta pomaka

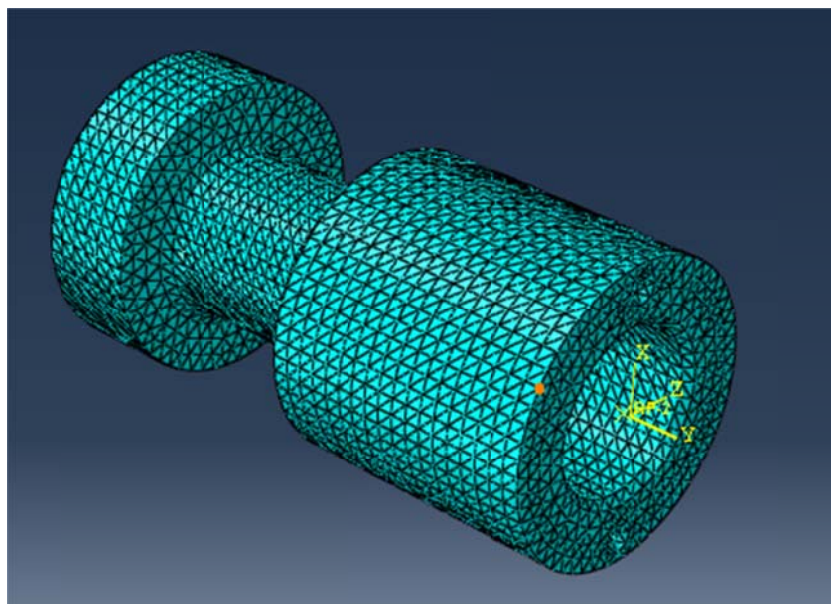
Generiranje rubnih uvjeta pomaka prikazano je na [Slika 64].



Slika 64: Zadavanje rubnih uvjeta pomaka za torzijski segment

10.3.4. Diskretizacija geometrije torzijskog segmenta

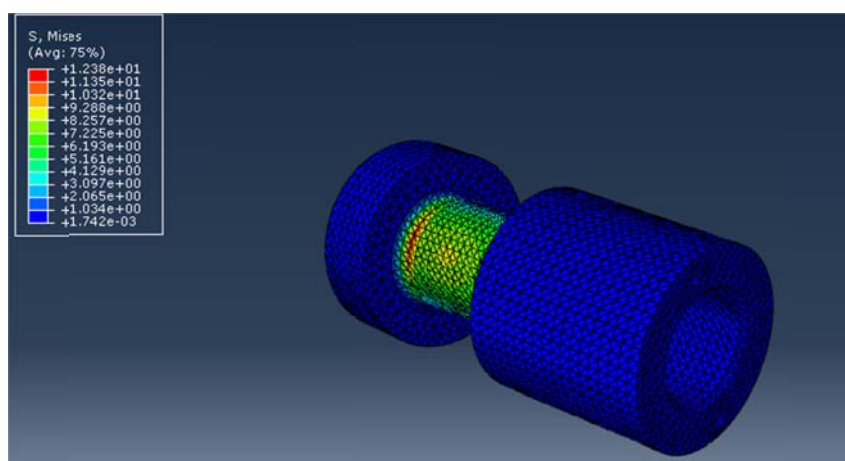
Geometrija vage diskretizirana je sa 18575 tetraedarskih konačnim elemenata oznake C3D10H 3D . Na (Slika 42) prikazana je diskretizirana geometrija . Na (Slika 65) prikazana je diskretizirana geometrija .



Slika 65: Diskretizirana geometrija torzijskog segmenta

10.3.5. Izračun ekvivalentnog naprezanja za minimalna opterećenja torzijskog segmenta

Na [Slika 66] prikazano je ekvivalentno naprezanje za minimalna opterećenja zadana u [Tablica 3].



Slika 66: Ekvivalentno naprezanje uslijed minimalnih opterećenja

Iz [14] str 172 za AlZn5,5MgCu-T6 očitana je vrijednost konvencionalne granice tečenja

$$R_{p\,0,2} = 485 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (10.18)$$

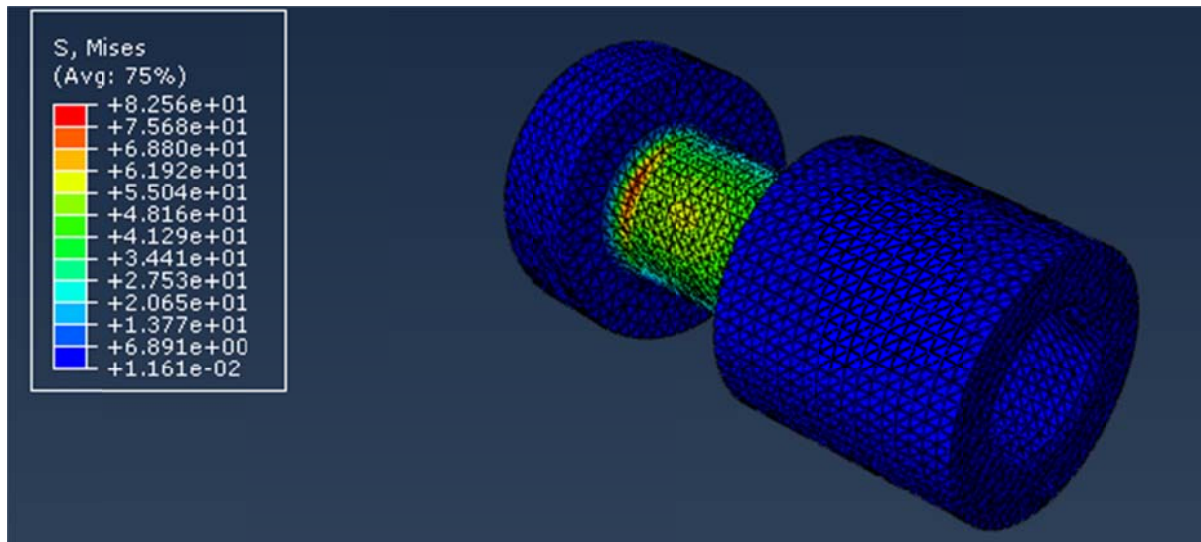
Prema [15] str 39 za dopušteno naprezanje za duktilne materijale

$$\sigma_{dop} = \frac{R_{p\,0,2}}{S_{potrebno}} = \frac{485}{3} = 161.67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (10.19)$$

Kako je maksimalno ekvivalentno naprezanje $\sigma_{ekv} = 12,38 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq \sigma_{dop}$ konstrukcija zadovoljava.

10.3.6. Izračun ekvivalentnog naprezanja za maksimalna opterećenja

Na [Slika 67] prikazano je ekvivalentno naprezanje za minimalna opterećenja zadana u [Tablica 3].



Slika 67: Ekvivalentno naprezanje uslijed maksimalnih opterećenja

Iz [14] str 172 za AlZn5,5MgCu-T6 očitana je vrijednost konvencionalne granice tečenja

$$R_{p\ 0,2} = 485 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (10.20)$$

Prema [15] str 39 za dopušteno naprezanje za duktilne materijale:

$$\sigma_{dop} = \frac{R_{p\ 0,2}}{S_{potrebno}} = \frac{485}{3} = 161.67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (10.21)$$

Kako je maksimalno ekvivalentno naprezanje $\sigma_{ekv\ max} = 82,56 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq \sigma_{dop}$ konstrukcija zadovoljava.

ZAKLJUČAK

Konstruiranje vage za mjerenje aerodinamičkih opterećenja u studentskom zračnom tunelu pokazalo se kao opsežan zadatak. Bez literature [11] izvršenje ovakvog zadatka zahtijevalo bi mnogo više vremena zbog toga što vage za mjerenje aerodinamičkih opterećenja proizvode već šest desetljeća prilikom čega se naučilo vrlo mnogo, a navedena literatura pružala je sažeti pregled najbitnijih principa.

Nakon što smo odabrali tip vage za mjerenje aerodinamičkih opterećenja na principu momenata savijanja (*moment type balance*) provedena je prilagodba geometrije za svaki pojedini segment s ciljem što boljeg odziva prilikom mjerenja opterećenja. Također su razmatrani razni način spajanja tenzometara u Wheatstoneov mjerni most kako bi došlo do kompenzacije signala uslijed ostalih opterećenja. Pokazalo se kako pravilnim redoslijedom spajanjem tenzometara u Wheatstoneov mjerni most moguće postići visok stupanj kompenzacije. Nažalost potpuna kompenzacija na takav način nije moguće provesti, ali je moguće smanjiti utjecaj ostalih opterećenja na prihvatljivu razinu. Prilagodba geometrije bila je velik zadatak jer se zbog zahtjeva za mjerenje manjih i većih opterećenja trebao provesti veliki broj iterativnih postupaka kako bi geometrija zadovoljavala raspon odziva od 0,1 do 1,5 mV/V.

Geometrija je također morala osiguravati da ne dođe do trajne plastične deformacije pa je prvo proveden proračun čvrstoće za minimalna opterećenja. Kako maksimalna opterećenja nisu bila navedena ona su odabrana na takav način da svaka mjerena komponenta pojedinačno ne izaziva veći odziv od 1,5 mV/V, a prilikom djelovanja svih opterećenja ekvivalentna naprezanja ne prelaze konvencionalnu granicu tečenja za odabrani materijal. Proračun je zbog kompleksnosti geometrije proveden u programskom paketu Abaqus 6.12. Na taj način lakše su raspoznate potencijalne zone nastanka loma te pravilnim preoblikovanjem i povećanjem radijusa zakrivljenosti smanjena naprezanja na kritičnim dijelovima. Kao što je vidljivo iz izrađenog proračuna moguće je odabrati i leguru aluminija lošijih mehaničkih svojstava ali na način da naprezanja ne prelaze konvencionalnu granicu tečenja. Prilikom generiranja raznih oblika geometrije programski paket Abaqus bio je od velike pomoći zbog grafičkog prikaza deformiranja raznih oblika geometrije te je na taj način olakšana je odluka odabira pozicija za lijepljene tenzometarskih traka.

S obzirom da konstruiranje takve vage zahtijeva veliko iskustvo realno je za očekivati kako možda postoje određeni zahtjevi koji se nisu predvidjeli, a pokazat će se kada nastupi eksploatacija vage.

LITERATURA

- [1] Hoffmann, K.: An Introduction to Measurements using Strain Gages
- [2] Hoffmann, K.: Applying the Wheatstone Bridge Circuit
- [3] HBM : Strain Gauges
- [4] Keil, S. : Beanspruchungsermittlung mit Dehnungsmeßstreifen 1995.
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge 3.8.2015
- [6] Alfrević, I. : Nauka o čvrstoći I 1995.
- [7] Kraut, B. Krautov Strojarski priručnik Sajema Zagreb 2009.
- [8] <https://www.grc.nasa.gov/www/K-12/airplane/tunbalint.html>
- [9] [https://en.wikipedia.org/wiki/Sting_\(fixture\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Sting_(fixture))
- [10] <http://www.mmtool.com/balances.html>
- [11] Tropea, Yarin ,Foss , Editors : Springer Hadnbook of Experimental Fluid Mechanics Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007.
- [12] Strain Gauges Absolute precision from HBM
- [13] <https://www.grc.nasa.gov/www/K-12/airplane/tunbalaxes.html>
- [14] Europa Lehrmittel: Tabellenbuch Metall 2014.
- [15] Nenad Kranjčević: Elementi strojeva 2012.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

